

# ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL



PROYECTO FIN DE CARRERA

## **ESTUDIO SOBRE LA MICROESTRUCTURA Y DUREZA DE UNA FUNDICIÓN NODULAR SOMETIDA A DISTINTOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS**

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL  
Especialidad Mecánica

Autor: Eduardo Garcia Biel  
Directora: M<sup>a</sup> Antonieta Madre Sediles



## **ÍNDICE**

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>4</b>
<b>1. RESUMEN.....</b>	<b>5</b>
<b>2. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....</b>	<b>6</b>
2.1. Objetivos generales.....	6
2.2. Objetivos específicos.....	6
2.3. Metodología general empleada.....	7
<b>3. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>8</b>
3.1. Fundición.....	8
3.2. Procedimientos utilizados.....	16
3.2.1. Tratamientos térmicos utilizados.....	16
3.2.2. Metalografía.....	21
3.2.3. Ensayo de dureza.....	35
3.3. Importancia microestructura en fundición nodular.....	37
<b>4. MARCO PRÁCTICO.....</b>	<b>38</b>
4.1. Equipos y materiales.....	38
4.2. Procedimiento experimental.....	39
4.2.1. Metalografía.....	39
4.2.2. Ensayo de dureza.....	43
<b>5. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....</b>	<b>45</b>
5.1 Ensayo dureza Rockwell.....	45
5.2 Metalografía.....	51
5.2.1 Muestra suministrada (sin tratamiento térmico).....	51
5.2.2 Muestras tratadas térmicamente a $t^a=850^{\circ}\text{C}$ .....	54
5.2.2.1 Tiempo solubilización de 1horas.....	54
5.2.2.2 Tiempo solubilización de 4horas.....	60
5.2.3 Muestras tratadas térmicamente a $t^a=1000^{\circ}\text{C}$ .....	67
5.2.3.1 Tiempo solubilización de 1horas.....	67
5.2.3.2 Tiempo solubilización de 4horas.....	75
5.3 Resumen datos e imágenes obtenidos.....	82
<b>6. CONCLUSIÓN.....</b>	<b>85</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>97</b>



## INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo, la fundición se ha considerado uno de los procesos de fabricación más importantes en la manufactura de piezas metálicas. Este proceso se remonta cerca de 2000 años A.C. y ha tenido grandes repercusiones en la historia debido a su gran uso en la industria y tecnología. Y es precisamente, el estudio de un tipo de fundición lo que me lleva a la realización de este proyecto, el cual es una aplicación práctica de los conocimientos adquiridos en la carrera de ingeniería técnica industrial (mecánica).

La fundición de hierro dúctil con grafito de morfología nodular, conocidas como fundiciones nodulares o esferoidales, están sustituyendo al acero fundido y forjado en la fabricación de piezas y partes de maquinarias. Esto es debido a su menor costo, a su mayor facilidad de obtención y excelente respuesta a los tratamientos térmicos, lo que permite obtener propiedades mecánicas similares a las logradas en las piezas de aceros.

Para las fundiciones de grafito esferoidal se hace imprescindible el estudio sobre los efectos que tienen los distintos tratamientos térmicos en su microestructura, dado que el tratamiento térmico es fundamental para favorecer sus propiedades mecánicas y así mejorar su posterior aplicación en la industria.



## **1. RESUMEN**

Con la realización de este proyecto se busca desarrollar los conocimientos, tanto prácticos como teóricos, obtenidos a lo largo de la carrera a través del estudio del efecto de distintos tratamientos térmicos sobre la dureza, composición y microestructura de una fundición de grafito esferoidal y matriz ferrítica en estado de bruto de colada, dichos tratamientos térmicos serán recocido, templado y normalizado.

En este proyecto se incluyen los resultados de los análisis microestructurales por microscopia óptica y el ensayo de dureza de muestras sometidas a diferentes tratamientos térmicos utilizando dos temperaturas distintas de calentamiento (1000°C y 850°C) y dos tiempos distintos de solubilización (1h y 4h).

El desarrollo experimental del proyecto se llevo a cabo en los laboratorios del departamento de ciencia y tecnología de los materiales e ingeniería metalúrgica, del Edificio Torres Quevedo.



## **2. OBJETIVOS DEL PROYECTO.**

### **2.1. OBJETIVOS GENERALES**

Los objetivos del presente proyecto es el estudio del efecto de distintos tratamientos térmicos sobre la dureza, composición y microestructura de una fundición de grafito esferoidal y matriz ferrítica en estado de bruto de colada.

A partir de los siguientes procedimientos:

- Tratamientos térmicos:
  - Recocido.
  - Normalizado.
  - Templado.
- Estudio metalográfico:
  - Preparación muestras para analizar.
  - Microscopio metalográfico.
- Ensayo de dureza:
  - Ensayo de dureza Rockwell B.
  - Ensayo de dureza Rockwell C.

Una vez se tenga el análisis y estudio de las muestras se procederá a comparar los efectos que los distintos tratamientos térmicos han tenido sobre la microestructura y la dureza de dichas muestras.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Preparar adecuadamente las muestras que necesitaremos para ser sometida a observación metalográfica y ensayo de dureza.
- Conocer los equipos involucrados en un estudio metalográfico.
- Adquirir nociones acerca de las propiedades de las fases presentes en la fundición de grafito esferoidal.
- Establecer diferencias visuales entre las fases presentes en dicha fundición.



- Estimar e interpretar la cantidad, forma, tamaño y distribución del carbono presente en la fundición.
- Distinguir entre los distintos tipos de tratamientos térmicos y sus consecuencias en la microestructura.
- Sacar las conclusiones adecuadas y correctas sobre todos los resultados y análisis derivados de la realización del proyecto.

### **2.3. METODOLOGIA GENERAL EMPLEADA**

La metodología utilizada para el análisis y estudio de la fundición nodular se distingue en distintas partes:

- Recopilar información teórica sobre la fundición de grafito esferoidal, tratamientos térmicos, ensayos de dureza y maquinas que se emplearan para el desarrollo del proyecto.
- Realizar el trabajo de laboratorio.
  - Preparación de las muestras
  - Observación muestras mediante microscopia óptica
  - Ensayo de dureza de las muestras
- Para finalizar se ha procedido a la toma, análisis y discusión de los datos obtenidos en el desarrollo de los diferentes procesos de laboratorio.



### **3. MARCO TEÓRICO**

#### **3.1. FUNDICIÓN**

Se denomina fundición a un tipo de aleaciones hierro-carbono en las que el contenido en carbono es superior al 2 por ciento, teniendo habitualmente un valor entre el 2,5 y 4,5 por ciento en peso, y con la presencia de silicio, generalmente con porcentajes entre 1 y 3 por ciento. A menudo lleva pequeños porcentajes en elemento de aleación como el manganeso, azufre o fósforo. En algunos casos es posible encontrar fundiciones especiales con alto contenido en elementos de aleación, como son el níquel, cromo o manganeso, para mejorar las propiedades mecánicas o producir estructuras martensíticas.

La aplicación de las fundiciones siempre es para la fabricación de piezas por moldeo, en moldes de arena o metálicos. Aunque las piezas se pueden colar directamente desde los altos hornos, obteniéndose arrabio, en la mayoría de las ocasiones se utilizan fundiciones de segunda fusión, preparada con los electos de aleación adecuados para controlar la composición. Esta fundición de segunda fusión se puede preparar en:

- crisoles, para pequeñas coladas;
- hornos eléctricos, para fundiciones de calidad;
- hornos de reverbero, para fundiciones de piezas grandes;
- cubilotes, hornos donde se obtienen la mayor parte de las fundiciones.

Las fundiciones se caracterizan por que la mayoría de ellas presentan grafito en su estructura. Esto es debido a que la cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), que es un compuesto metaestable, en presencia de un elemento formador de grafito (grafitizador), como el silicio, y a velocidades de enfriamiento y solidificación lentas se disocia en sus dos componentes estables, ferrita y grafito, según la ecuación:

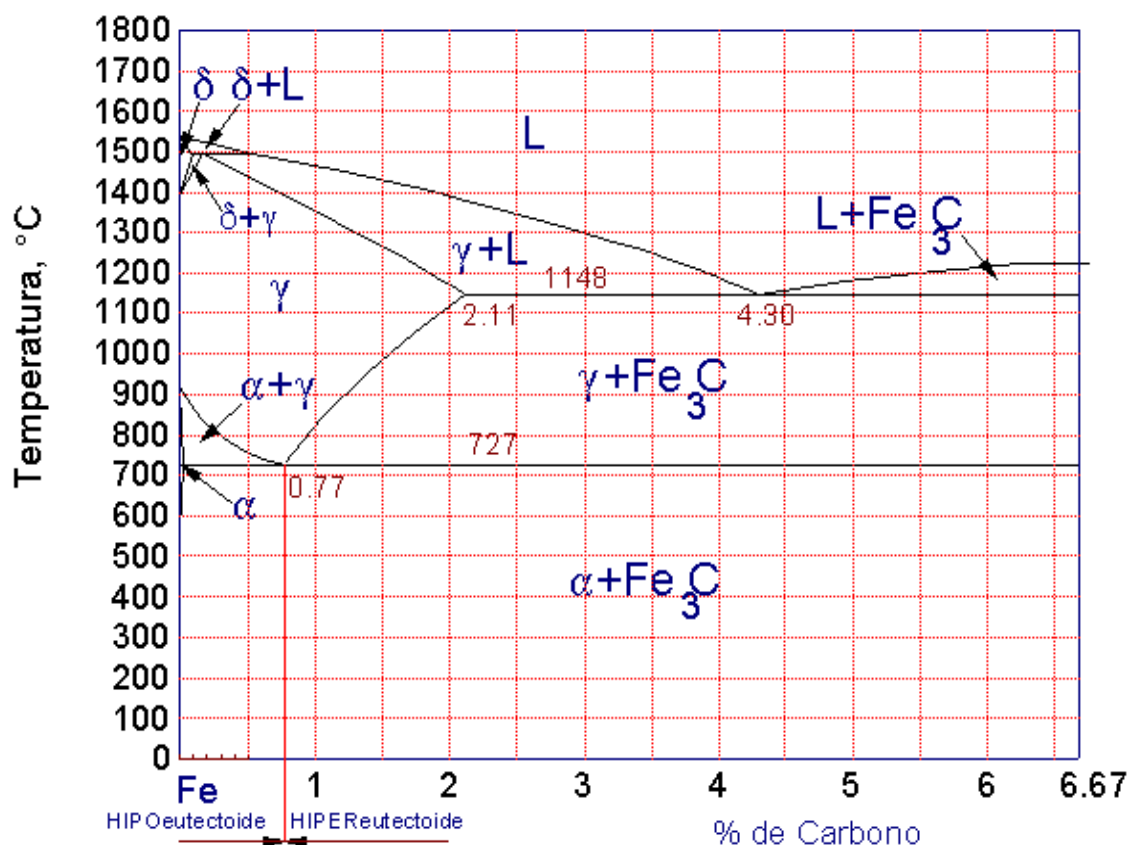




De esta forma, en el enfriamiento el verdadero diagrama hierro-carbono queda ligeramente modificado, donde el grafito sustituye a la cementita, pero la temperatura del eutéctico y eutectoide apenas varían, aumentando tan solo 6 y 11 °C, respectivamente. La tendencia a la grafitización se regula mediante la composición y la velocidad de enfriamiento.

Para caracterizar el grafito observado es necesario conocer la forma, distribución y tamaño de las partículas. El factor que mas influye en las propiedades es la forma en la que precipita el grafito. En la norma UNE-EN ISO 945 vienen indicadas distintas figuras en que puede solidificar el grafito en las fundiciones, desde una forma laminar hasta esferoidal.

### Diagrama hierro-carbono



En la imagen anterior se muestra el diagrama de fases de la aleación hierro-Carbono, que muestra en el eje vertical la temperatura y en el eje horizontal la composición química. En el extremo izquierdo se encuentra la composición 100% Fe y 0% C y en el extremo derecho se encuentra la composición 100% C y 0% Fe.

En la figura se muestra solamente hasta 5% C y 95% Fe por ser la zona de mayor interés ya que contiene los aceros y las fundiciones de mayor uso. Este verdadero mapa de ordenamientos cristalinos nos muestra cómo el metal al solidificar se dispone en diversas formas. Al variar la temperatura, los cristales ganan o pierden energía y buscan una nueva ordenación tratando siempre de permanecer estables.

### **Propiedades de las fundiciones**

Las fundiciones son ampliamente utilizadas en el mundo de la ingeniería, cada día más, desplazando al acero para algunas aplicaciones, como, por ejemplo, en los cigüeñales de los motores. Esto es debido a las ventajas que presentan, las cuales a continuación son detalladas:

- Sus mejores características a la hora de obtener piezas fundidas. Debido fundamentalmente a que la temperatura de fusión es del orden de 300-350 °C inferior a los aceros utilizados para fundición, además de tener mayor fluidez, por lo que se pueden fundir tanto piezas grandes como piezas pequeñas, y de presentar menor contracción durante la solidificación evitando así los rechupes, gracias al mayor volumen que ocupa el grafito.
- Presentan una gran facilidad de mecanización y maquinabilidad, por lo que es más sencillo mecanizar una pieza de fundición que una de acero.
- Los factores anteriores hacen que generalmente, las piezas de fundición resulten un 30-40 por ciento más baratas que si se fabricasen con acero moldeado.
- Presentan buena resistencia al desgaste debido a que el grafito actúa como lubricante y además como amortiguador acústico y de vibraciones.



- Tienen muy buena resistencia a la compresión, variando sus valores según el tipo de fundición. La resistencia a la tracción varía mucho, desde valores muy bajos (100 MPa/mm<sup>2</sup>), hasta valores de (1200 MPa/mm<sup>2</sup>) en fundiciones de grafito esferoidal templadas.

Sin embargo su utilidad se ve limitada debido a que el grafito puede actuar como nucleador de grietas, presentando relativamente mala tenacidad, así como la baja resistencia a la tracción indicada anteriormente.

Todas las fundiciones excepto las blancas, poseen una microestructura que consta de una fase de grafito, entre 8-14 por ciento, una matriz que puede ser ferrita, perlita, bainita, martensita, o una mezcla de varias de ellas. El grafito y la matriz van a determinar las propiedades mecánicas de las fundiciones. Ambos microconstituyentes pueden controlarse a través de la composición química y los tratamientos térmicos.

Debido a la existencia de elementos de aleación, como el silicio o fósforo, se suele hablar, no del contenido en carbono sino del contenido en carbono equivalente (CE), ya que van a ejercer efectos similares a los del carbono. El CE se calcula como:

$$\%CE = \%C + \%Si/3 + \%P/3$$

El cálculo del CE permite evaluar el efecto de la composición de los elementos en las fundiciones no aleadas. Permite estimar si una determinada fundición será hipo o hipereutéctica durante la solidificación.

### **Fundición de grafito esferoidal o nodular**

La fundición de grafito esferoidal o nodular es muy similar a la gris, en cuanto a su composición. La diferencia se produce en la forma en que se encuentra el grafito, presentando nódulos o esferas en lugar de láminas. Esto se consigue mediante la adición de **cerio y/o magnesio** a la colada. Estos elementos producen la nodulización típica de estas fundiciones.



La denominación de estas fundiciones, según la norma UNE 36 118 es mediante tres letras FGE, (siglas de Fundición de Grafito Esferoidal), seguidas de dos números indicativos de la resistencia mínima a la tracción y el alargamiento mínimo, separados por un guión. Por ejemplo, una fundición de grafito esferoidal de 500 MPa/mm<sup>2</sup> de resistencia mínima a la tracción y con un 7 por ciento de alargamiento mínimo, vendría indicado como FGE 50-7.

La norma anteriormente indicada ha sido sustituida por la norma UNE-EN 1563 aunque la he mencionado anteriormente debido a que aun sigue en uso, según nueva normativa las fundiciones de grafito esferoidal se designan mediante tres letras GJS, seguidas de dos números indicativos de la resistencia mínima a la tracción y el alargamiento mínimo. También se pueden clasificar en función de la dureza brinell, se designarían mediante las tres letras GJS seguidas de las siglas HB y el valor de la dureza brinell obtenido.

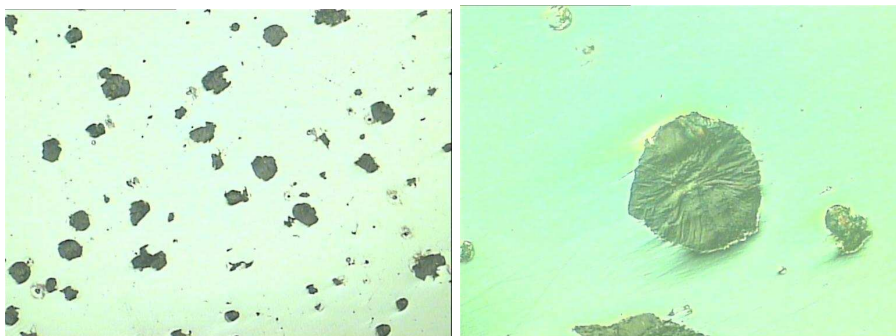
Presentan una microestructura con nódulos de grafito en una matriz que puede ser ferrita, perlita o una mezcla de ambas, con estas fundiciones se consiguen alcanzar características mecánicas similares a las de los aceros.

Si la matriz es perlítica es posible obtener cargas de resistencia a la tracción de 900 MPa/mm<sup>2</sup> y alargamientos del 3 por ciento que pueden mejorar por tratamiento térmico.

Las fundiciones ferríticas tienen resistencias de 380-400 MPa/mm<sup>2</sup> que aun siendo bajas, son superiores a las que presentan las fundiciones grises, y buenos alargamientos del 18 por ciento.

La gran ductilidad de estas fundiciones hace que se conozcan también con el nombre de **fundiciones dúctiles**.

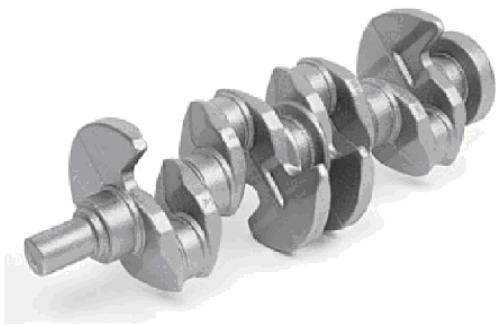
A continuación podemos observar en estas imágenes microscópicas la forma del grafito en esferas.



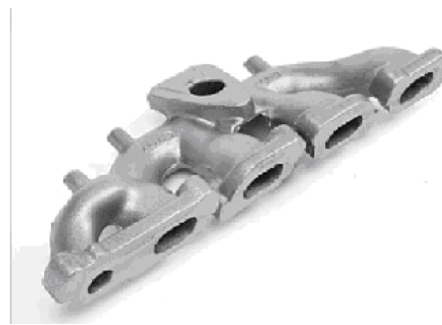
### Aplicaciones fundición de grafito esferoidal

Las características mecánicas similares a los aceros, junto con sus buenas características de moldeo y mecanización, hace que estos materiales hallan experimentado en los últimos veinticinco años un gran aumento en la producción, para aplicaciones como válvulas y cuerpos de bombas, engranajes, rodillos, etc.

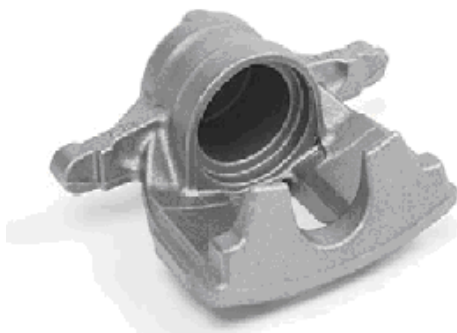
En el mundo de la automoción se aplica con gran frecuencia para la fabricación de piezas como bielas, cigüeñales, tapetas, volantes motor, colectores, turbocompresores, partes de la transmisión, partes suspensión, partes dirección, piezas del sistema de frenado y soporte de chasis.



Cigüeñal



Colector



Pinza freno



Carcasa turbina de turbocompresor



## Constituyentes microestructurales fundición

En los aceros, el carbono se encuentra en general, o combinado en forma de cementita o disuelto, rara vez en forma de grafito. Este es el motivo por el cual solo se emplea el diagrama de equilibrio metaestable Fe - Fe<sub>3</sub>C para el estudio de los aceros. Los constituyentes estructurales de equilibrio de los aceros son:

### Austenita

Se define como una solución sólida de carbono en hierro gamma. Solo es estable a temperaturas superiores a 723 °C, desdoblándose por reacción eutectoide, a temperaturas inferiores, en ferrita y cementita. Solo puede aparecer austenita a temperatura ambiente en los aceros austeníticos, en este caso la austenita si es estable a temperatura ambiente. Es deformable como el hierro gamma, poco duro, presenta gran resistencia al desgaste, es magnética, es el constituyente más denso de los aceros y no se ataca con reactivos. La resistencia de la austenita retenida a la temperatura ambiente oscila entre 800 y 1000 MPa/mm<sup>2</sup> y el alargamiento entre 20 y 25 %. Puede disolver hasta 1,7-1,8 % de carbono. Presenta red cristalográfica cúbica centrada en las caras (c.c.c.), con los siguientes parámetros de red,  $a=3,67 \text{ \AA}$  y  $d=2,52 \text{ \AA}$ .

### Ferrita

Este constituyente está formado por una solución sólida de inserción de carbono en hierro alfa. Es el constituyente más blando de los aceros pero es el más tenaz, es el más maleable, su resistencia a la tracción es de 280 MPa/mm<sup>2</sup> y su alargamiento de 35 %. Su solubilidad máxima es de 0,008 %. Puede también mantener en solución de sustitución a otros elementos tales como Si, P, Ni, Cr, Cu... que figuran en los aceros, bien como impurezas, bien como elementos de aleación. La ferrita se presenta en los aceros hipoeutectoides como constituyente y mezclada con la cementita entra a formar parte de la perlita. Si el acero es muy pobre en carbono, su estructura está formada casi en su totalidad por granos de ferrita cuyos límites pueden revelarse fácilmente con el microscopio, después de un ataque con ácido nítrico diluido. Los granos son equiaxiales.



### Perlita

Está formada por una mezcla eutectoide de dos fases, ferrita y cementita, se produce a 723 °C cuando la composición es de 0,8 %. Su estructura está constituida por láminas alternadas de ferrita y cementita, siendo el espesor de las láminas de ferrita superior al de las de cementita, estas últimas quedan en relieve después del ataque con ácido nítrico, lo cual hace que en la observación microscópica se revelen por las sombras que proyectan sobre las láminas de ferrita. La perlita es más dura y resistente que la ferrita, pero más blanda y maleable que la cementita. Se presenta en forma laminar, reticular y globular.

### Cementita

Es un constituyente que aparece en fundiciones y aceros. Es el carburo de hierro, de fórmula  $Fe_3C$ , que cristaliza en el sistema ortorrómbico. Es muy frágil y duro, teniendo sobre 840 Vickers, y es muy resistente al rozamiento en las fundiciones atruchadas. A bajas temperaturas es ferromagnético y pierde esta propiedad a 212 °C (punto de Curie).

Se piensa que funde por encima de 1950 °C, y es termodinámicamente inestable a temperaturas inferiores a 1200 °C. Se puede presentar en forma reticular, laminar y globular.

### Bainita

Es el constituyente que se obtiene en la transformación isotérmica de la austenita cuando la temperatura del baño de enfriamiento es de 250 a 500°C. Se diferencian 2 tipos de estructuras: la Bainita superior de aspecto arborescente formada a 500-580°C, compuesta por una matriz ferrítica conteniendo carburos y la Bainita inferior, formada a 250-4000 °C tiene un aspecto similar a la martensita y esta constituida por agujas alargadas de ferrita que contienen delgadas placas de carburos. La bainita tiene una dureza que va de 40 a 60 HRC.





### Martensita

Es una solución sólida, intersticial, sobresaturada de carbono en hierro alfa. Es el constituyente estructural de temple de los aceros y su microestructura se presenta en forma de agujas cruzadas. Los átomos de hierro están como en la ferrita, en los vértices. Los átomos de carbono están en las caras y en las aristas, presenta por tanto una red distorsionada.

Esta distorsión de la red es la responsable de la dureza de la martensita. Presenta una red tetragonal. Sus características mecánicas son resistencia a la tracción entre 170-250 Kg/mm<sup>2</sup>, dureza HRc entre 50-60, alargamiento de 0,5 % y es magnética.

## **3.2. PROCEDIMIENTOS UTILIZADOS**

Los procedimientos experimentales utilizados durante la realización del presente proyecto son tratamientos térmicos, metalografía y ensayo de dureza. A continuación se describe teóricamente cada procedimiento.

### **3.2.1. Tratamientos térmicos**

Los Tratamientos Térmicos se refieren a una amplia gama de operaciones llevadas a cabo a elevadas temperaturas, con las cuales se transforman las propiedades de los metales y de las aleaciones para poder trabajarlos eficientemente o para conferirles determinadas características mecánicas o tecnológicas.

Desde el momento en el que un material entra en la fabricación, de la mayoría de los objetos metálicos, sufre por lo menos un tratamiento térmico en alguna fase de su producción, puede considerarse que este tratamiento es parte importante de la moderna tecnología industrial.

De lo antes expuesto podemos deducir que los tratamientos térmicos son operaciones de calentamiento y enfriamiento a temperaturas y en condiciones determinadas, a que se someten los aceros (y otros metales y aleaciones), para darles características más adecuadas para su empleo; estos





no modifican la composición química pero si otros factores como su constitución, estructura y estado mecánico.

### **Factores de Importancia en un Tratamiento Térmico.**

1. Es uno de los pasos principales para que pueda alcanzar las propiedades mecánicas para las cuales esta creado.
2. La clave de los tratamientos térmicos consiste en las reacciones que se producen en el material, tanto en los aceros como en las aleaciones no férricas, y ocurren durante el proceso de calentamiento y enfriamiento de las piezas, con unas pautas o tiempos establecido.
3. A través de los tratamientos se modifican la constitución del acero, variando el estado en el que se encuentra el carbono, y el estado alotrópico del hierro.
4. Se modifica la estructura, variando el tamaño de grano y el reparto de los constituyentes.
5. El estado mecánico queda afectado por las tensiones a las cuales son sometidos los materiales luego de algunos **TT**, principalmente después de un temple.
6. El producto sólido se expone parcial o totalmente a ciclos térmicos según lo amerite la ocasión.
7. Por medio de tratamientos termoquímicos se pueden alterar las propiedades químicas del material esencialmente del acero.
8. Deben ser tomadas en cuenta tanto la temperatura de enfriamiento como la de calentamiento y de igual forma los medios en lo que se efectúen los tratamientos como tales.
9. Otros factores que deben ser considerados son: La composición del material, la velocidad de calentamiento, duración del tratamiento.
10. Casi todos los tratamientos se llevan a cabo en hornos especiales, que pueden ser de tipo continuo, con zonas a temperaturas diferentes por las que va pasando la pieza, o bien de tipo discontinuo. El enfriamiento puede tener lugar dentro o fuera del horno.



El desarrollo de los tratamientos térmicos se desarrolla preferiblemente en tres fases (calentamiento a temperatura máxima, permanencia a la temperatura máxima, enfriamiento desde la temperatura máxima a la temperatura ambiente).

### **Tratamientos térmicos de la fundición de grafito esferoidal:**

Estas fundiciones presentan como una de sus características principales su gran aptitud para los tratamientos térmicos, que producen entonces una gran gama de propiedades en la fundición que se pueden aprovechar desde el punto de vista mecánico. Estas aleaciones responden a los tratamientos de temple y revenido en forma más o menos parecida a como lo hacen los aceros, el porcentaje de carbono que se encuentra en la matriz (carbono activo) varía entre 0 y 1% según la composición, el proceso de fusión o el espesor de la pieza, además el carbono que se encuentra en forma de grafito puede actuar como suplementario o de reserva durante el proceso de recarburación o descarburación.

La matriz puede ser entonces ferrita, perlita, martensita, martensita revenida, bainita o mezcla de dos o más microestructuras, las cuales se consiguen con diversos tipos de tratamientos, tales como revenido, recocido, normalizado, temple, austempering, endurecimientos superficiales, etc., dependiendo de las propiedades que se desean obtener. A continuación se explican brevemente algunos de los tratamientos térmicos que se emplean más comúnmente:

#### Recocido

El recocido es un tratamiento térmico que consiste en un calentamiento a temperatura variable, dependiendo del tipo de recocido, un adecuado mantenimiento a la temperatura dada y un enfriamiento realizado en unas condiciones tales que, cuando se alcanza la temperatura ambiente, el metal está en un estado estructural muy próximo al estado de equilibrio estable.



Este tratamiento se recomienda realizarlo cuando se desea obtener de la pieza la máxima ductilidad o la máxima maquinabilidad ya que se logra una estructura de matriz ferrítica con grafito nodular en ella, el recocido generalmente se realiza en dos etapas:

1. Se lleva la pieza a una temperatura un poco por encima de la crítica, con el fin de disolver los carburos presente es la matriz en la austenita.
2. Se enfría lentamente para que se presente la transformación de austenita a ferrita y para que el carbono se precipite en forma de grafito en los alrededores de los nódulos, la temperatura depende de la composición del metal, pero varía muy poco.

El principal objetivo de este tratamiento es ablandar el acero o fundición dejándolo en las condiciones adecuadas para su transformación posterior o para que quede en su forma más estable.

### Templado

Consiste en un calentamiento del material hasta una temperatura crítica seguido de un enfriamiento muy rápido, para impedir la transformación normal del constituyente obtenido en el calentamiento. El objetivo central del temple es fundamentalmente, aumentar la dureza y resistencia mecánica.

El constituyente obtenido es la **Martensita**, la cual representa la sobresaturación distorsionada de los cristales de hierro alfa. El temple utiliza como medios de enfriamiento agua, aceites, baños de plomo, mercurio y sales fundidas. Las temperaturas del temple son algo más elevada que la crítica superior  $A_c$  (entre 900-950°C)

La obtención de la martensita se da con el enfriamiento rápido del acero desde la zona de la fase austenítica la cual se consigue con una consistencia dura y frágil. La profundidad del temple de un componente enfriado con rapidez depende de su templabilidad (capacidad a la penetración del temple), que a su vez depende, fundamentalmente, del diámetro o espesor de la pieza y de la



calidad del acero y de la misma forma esta en función de la composición del acero y del tamaño de grano.

Un acero de determinada templabilidad adquiere un grado de temple tanto mayor cuanto más elevada sea la velocidad de enfriamiento, que, a su vez, depende del medio de enfriamiento, del grado de agitación y del espesor de la pieza.

El enfriamiento de la pieza se lleva acabo sumergiéndola calientes en un baño de inmersión que puede contener, en orden ascendente de eficacia, como los mencionados con anterioridad.

### Normalizado

Es un tratamiento térmico que se practica calentando el material a una temperatura superior a la crítica ( $A_c$ ), y una vez que haya pasado todo el metal al estado austenítico, se deja enfriar al aire lentamente.

El objetivo del normalizado es volver al acero al estado que se supone normal después de haber sufrido, tratamientos defectuosos, o bien luego de haber sido trabajados en frío o en caliente por forja, laminación, etc. Se consigue así afinar su estructura y eliminar tensiones internas.

Es recomendable tener presente que el uso de este proceso también se usa para disminuir el tamaño de grano, brindándoles de esta forma propiedades metalúrgicas a las piezas en su mayoría forjadas tales como ruedas dentadas en bruto, a las cuales les mejora su capacidad de mecanización y así mismo les proporciona características óptimas para aplicar sobre ellas temple con un mínimo de deformación.

El normalizado suaviza los aceros de bajo carbono y poco aleados, pero, en realidad, puede convertirse en un proceso de temple al aplicarse en aceros de alto carbono o muy aleados.



### **3.2.2. Metalografía**

La metalografía es el examen de las superficies de metales y aleaciones. Numerosos requerimientos son utilizados como información concerniente a la preparación mecánica de varios materiales, mediante el estudio microscópico. El propósito de la preparación de muestras metalográficas, es producir una superficie pulida que represente una microestructura específica que pueda ser observada a través del microscopio.

#### **Desarrollo**

Es la ciencia que estudia las características estructurales o constitutivas de un metal o aleación relacionándolas con las propiedades físicas y mecánicas.

Entre las características estructurales están el tamaño de grano, el tamaño, forma y distribución de las fases que comprenden la aleación y de las inclusiones no metálicas, así como la presencia de segregaciones y otras irregularidades que profundamente pueden modificar las propiedades mecánicas y el comportamiento general de un metal.

Mucha es la información que puede suministrar un examen metalográfico. El principal instrumento para la realización de un examen metalográfico es el microscopio metalográfico, con el cual es posible examinar una muestra con aumentos que varían entre 50 y 2000 aumentos.

#### **Objetivo principal de la metalografía**

Es la realización de una reseña histórica del material buscando microestructura, inclusiones, tratamientos térmicos a los que haya sido sometido, microrechupes, con el fin de determinar si dicho material cumple con los requisitos para los cuales ha sido diseñado; además hallaremos la presencia de material fundido, forjado y laminado. Se conocerá la distribución



de fases que componen la aleación y las inclusiones no metálicas, así como la presencia de segregaciones y otras irregularidades.

### **Operaciones que hay que seguir para preparar una muestra metalográfica**

#### **a) Corte:**

El tamaño de la muestra siempre que se pueda debe ser tal que su manejo no encierre dificultad en la operación.

- **Corte por Sierra**

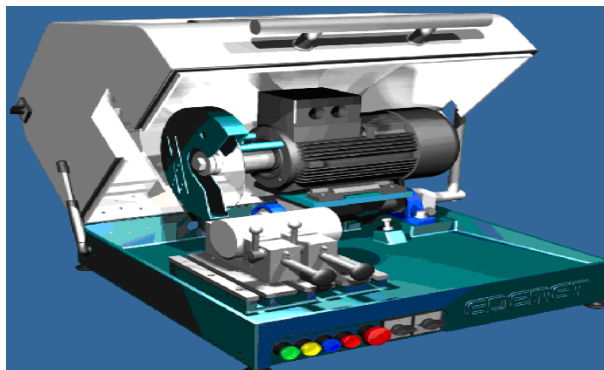
Produce severas condiciones de trabajo en frío y no es ventajoso. El corte mediante este método ocasiona superficies irregulares con valles excesivamente altos, dando como efecto más tiempo de aplicación de las técnicas de preparación de las muestras.

Generalmente este tipo de corte es utilizado para extraer probetas de piezas muy grandes, para poder luego proceder con el corte abrasivo y adecuar la probeta a los requerimientos necesarios.

- **Corte por Disco Abrasivo**

Este tipo de corte es el más utilizado, ya que la superficie resultante es suave, y el corte se realiza rápidamente.

Los discos para los cortes abrasivos, están formados por granos abrasivos (tales como óxido de aluminio o carburo de silicio), aglutinados con goma u otros materiales. Los discos con aglutinantes de goma son los más usados para corte húmedo; los de resina son para corte en seco.



b) Montaje de muestras:

Con frecuencia, la muestra a preparar, por sus dimensiones o por su forma, no permite ser pulida directamente, sino que es preciso montarla o embutirla en una pastilla. El material del que se componen estas puede ser Lucita (resina termoplástica) o Bakelita (resina termoendurecible).

c) Desbaste:

Después de montada la probeta, se inicia el proceso de desbaste sobre una serie de hojas de esmeril o lija con abrasivos más finos, sucesivamente. El proceso de desbaste se divide en 3 fases: Desbaste grosero, Desbaste intermedio y Desbaste final. Cada etapa de preparación de probetas metalográficas debe realizarse muy cuidadosamente para obtener al final una superficie exenta de rayas.

- Desbaste Grosero

Es el desbaste inicial, que tiene como objetivo planear la probeta, lo cual puede hacerse a mano y aun mejor con ayuda de una lijadora de banda. El papel de lija utilizado es de carburo de silicio con granos de 240. En cualquier caso, la presión de la probeta sobre la lija o papel de esmeril debe ser suave, para evitar la distorsión y rayado excesivo del metal.

- Desbaste Intermedio

Se realiza apoyando la probeta sobre el papel de lija o de esmeril, colocado sobre una mesa plana o esmeriladora de banda fija. En esta fase se utilizan los papeles de lija No. 320/340 y 400.

- Desbaste Final

Se realiza de la misma forma que los anteriores, con papel de lija No. 600. En todo caso, en cada fase del desbaste debe tomarse siempre en cuenta el sistema refrigerante. Cada vez que se cambie de papel, debe girarse 90 grados, en dirección perpendicular a la que se seguía con el papel de lija anterior, hasta que las rayas desaparezcan por completo. Se avanza y se facilita mucho las operaciones descritas utilizando una pulidora de discos, a las que se fija los papeles de lija adecuado en cada fase de la operación. Las



velocidades empleadas varían de 150 a 250 rpm. En otro caso se pueden utilizar devastadoras fijas o de bandas giratorias.

d) Pulido:

▪ Pulido fino

La última aproximación a una superficie plana libre de ralladuras se obtiene mediante una rueda giratoria húmeda cubierta con un paño cargado con partículas abrasivas seleccionadas en su tamaño. En éste sentido, existen muchos abrasivos, prefiriendo a gamma del oxido de aluminio para pulir metales ferrosos, los basados en cobre u oxido de cerio para pulir aluminio, magnesio y sus aleaciones.

Otros abrasivos son la pasta de diamante, oxido de cromo y oxido de magnesio. La selección del paño para pulir depende del material que se va a pulir y el propósito del estudio metalográfico.

▪ Pulido electrolítico

Es una alternativa de mejorar al pulido total pudiendo reemplazar al fino pero muy difícilmente al pulido intermedio. Se realiza colocando la muestra sobre el orificio de la superficie de un tanque que contiene la solución electrolítica previamente seleccionada, haciendo las veces de ánodo. Como cátodo se emplea un material inerte como platino, aleación de níquel, cromo, etc.

Dentro del tanque hay unas aspas que contienen en constante agitación al líquido para que circule permanentemente por la superficie atacándola y puliéndola a la vez.

Deben controlarse el tiempo, el amperaje, el voltaje y la velocidad de rotación del electrolito para obtener un pulido satisfactorio. Muchas veces después de terminado este pulido la muestra queda con el ataque químico deseado para la observación en el microscopio.







e) Ataque:

El propósito del ataque químico es hacer visibles las características estructurales del metal o aleación. El proceso debe ser tal que queden claramente diferenciadas las partes de la micro estructura.

Esto se logra mediante un reactivo apropiado que somete a la superficie pulida a una acción química. Los reactivos que se utilizan consisten en ácidos orgánicos o inorgánicos y los álcalis disueltos en alcohol, agua u otros solventes. En la tabla que se muestra a continuación se observan los reactivos más comunes.

Las muestras pueden ahora atacarse durante el tiempo necesario sumergiéndolas boca abajo en una solución contenida en una caja de Petri. Un método opcional consiste en aplicar el reactivo con un gotero para ojos. Si el tiempo de ataque es demasiado corto, la muestra quedará subatacada y los límites de grano y otras configuraciones se verán desvanecidos e indistintos cuando se observen en el microscopio. Si el tiempo de ataque es demasiado largo, la muestra se sobre atacará y quedará muy oscura, mostrando colores no usuales. El tiempo de ataque debe controlarse muy cuidadosamente.

La acción del ataque se detiene al colocar la muestra bajo una corriente de agua. Límpiase la muestra con alcohol y utilice una secadora de pelo para terminar de secarla. Cuídese de no frotar la muestra pulida y atacada con alguna tela o con los dedos, porque esto altera la condición superficial del metal.



REACTIVO	COMPOSICION	OBSERVACIONES
<b>Nital</b>	2 a 5% de ácido nítrico en alcohol metílico.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obscurece la perlita en aceros al carbono</li> <li>• Diferencia la perlita de la martensita: revela los límites de grano de la ferrita, muestra la profundidad del núcleo en los aceros nitrurados.</li> <li>• Tiempo: 5 a 60 segundos</li> </ul>
<b>Picral</b>	4 g de ácido pícrico en 100 ml de alcohol metílico.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para aceros al carbón y de baja aleación es tan bueno como el nital para revelar los límites de grano de la ferrita.</li> <li>• Tiempo 5 a 120 segundos.</li> </ul>
Ácido clorhídrico y ácido pícrico.	5 g de ácido clorhídrico y 1 g de ácido pícrico. En 100ml de alcohol metílico.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revela los granos de austenita en los aceros templados y en los templados y revenidos.</li> </ul>

## Técnicas de preparación metalografías

### ***Preparación Normal o Tradicional***

#### *Esmerilado burdo o tosco:*

La muestra debe ser de un tamaño de fácil manipulación. Una muestra blanda se puede aplanar si se mueve lentamente hacia arriba y abajo a través de una superficie de una lima plana poco áspera.

La muestra plana o dura puede esmerilarse sobre una lija de banda, manteniendo la muestra fría sumergiéndola frecuentemente en agua durante la



operación de esmerilado, evitando alterar su estado con el calor que se produce en el acto de pulido y así mantener una misma fase.

En todas las operaciones de esmerilado, la muestra debe moverse en sentido perpendicular a la ralladura existente. El esmerilado, continúa hasta que la superficie quede plana, y todas las ralladuras debidas al corte manual o Metalografía al disco cortador no sean visibles, emulando la superficie de un espejo.

#### Montaje:

Este paso se realiza en el caso que las muestras sean pequeñas o de difícil manipulación en las etapas de pulido intermedio y final. Piezas pequeñas como tornillos, tuercas, muestras de hojas metálicas, secciones delgadas entre otros, deben montarse en un material adecuado o sujetarse rígidamente en una monta mecánica.

La resina que se utiliza para fijar la probeta, se aplica a la probeta por medio de temperatura, es decir, es una resina termo-fijadora, comúnmente empleada para montar muestras es la baquelita. La muestra y cantidades correctas de baquelita, se colocan en un cilindro de la prensa de montar manual. La temperatura y presión aplicada producen una fuerte adhesión de la baquelita a la muestra, proporcionando un tamaño uniforme convenientes para manipular las muestras en operaciones de pulido posteriores.

#### Pulido Intermedio:

Luego del paso anterior, la muestra se pule sobre una serie de hojas de esmeril o lijas que contienen abrasivos finos.

El primer papel es generalmente N° 150 luego 200, 300, 400 y finalmente es posible encontrar en el mercado N°1500. Antes de pulir con la siguiente lija se debe girar en 90° la muestra, a fin de eliminar el rayado realizado con la lija anterior. Las operaciones de pulido intermedio con lijas de esmeril se hacen en húmedo; sin embargo, en ciertos casos, es conveniente realizar este paso en seco ya que ciertas aleaciones se corroen fácilmente por la acción del agua.



### **Pulido Fino:**

Esta etapa representa una de los pasos de mayor cuidado por parte del preparador de muestras, ya que en muchas ocasiones en la superficie del metal se han formado doubles caras o planos y que por supuesto por ningún motivo pueden ser utilizadas para el pulido fino, sino se remedia tal defecto superficial.

El pulido fino se realiza mediante un disco giratorio cubierto con un paño especial, húmedo, cargado con partículas abrasivas, como es el oxido de aluminio para pulir materiales ferrosos y de los base cobre, y oxido de cerio para pulir aluminio, magnesio y sus aleaciones. La selección del paño para pulir depende del material y del propósito del estudio metalográfico. Se pueden encontrar paños de lanilla o pelillo, similares a los que se utilizan el las mesas de pool. También se pueden encontrar paños sintéticos para pulir con fines de pulido general, de los cuales el Gama y el Micropaño son los que se utilizan más ampliamente.

### **Preparación Electroquímica**

La técnica por pulido electroquímico requiere al igual que el caso anterior, la selección de una probeta de un tamaño apropiado para luego utilizar el electropulido.

Este método consiste en una disolución electroquímica de la superficie del metal que produce un aislamiento y pulido, se aplica por lo general a muestras pequeñas. En el caso de metales blandos se requiere tomar ciertas precauciones para realizar el pulido debido a que se pueden formar capas amorfas.

Para que ello no ocurra se utiliza también el pulido electrolítico, para lo cual se coloca la probeta como ánodo en una solución adecuada de electrolito (suspendida por un hilo de platino sujeta por pinzas conectadas al polo positivo de una batería) de tal forma de aplicar una fuerza electromotriz creciente, la intensidad se va a elevar hasta alcanzar un máximo. Aunque el potencial va aumentando, cae hasta alcanzar un valor constante y luego se vuelve a elevar



bruscamente. Esta parte constante de la curva indica que corresponde al período de formación de la superficie lisa y brillante. Las probetas se lavan y luego se atacan por el método usual o bien se puede utilizar un ataque electrolítico que consiste en reducir la intensidad de corriente sin cambiar el electrolito inicial.

### **Descripción del microscopio metalográfico**

En comparación al microscopio biológico el microscopio metalúrgico difiere en la manera en que la luz es proyectada. Como una muestra metalográfica es opaca a la luz, la misma debe ser iluminada por luz reflejada. Un haz de luz horizontal de alguna fuente de luz es reflejado, por medio de un reflector de vidrio plano, hacia abajo a través del objetivo del microscopio sobre la superficie de la muestra. Un poco de esta luz incidente reflejada desde la superficie de la muestra se amplificará al pasar a través del sistema inferior de lentes, el objetivo, y continuará hacia arriba a través del reflector de vidrio plano; luego, una vez más lo amplificará el sistema superior de lentes, el ocular. El poder de amplificación inicial del objetivo y del ocular está generalmente grabado en la base del lente. Cuando es utilizada una combinación particular de objetivo y ocular y una longitud adecuada de tubo, la amplificación total es igual al producto de las amplificaciones del objetivo y ocular. La amplificación máxima obtenida con el microscopio óptico es de unos 2000 x.

La limitación principal es la longitud de onda de la luz visible, la cual limita la resolución de los detalles finos de la muestra metalográfica. La utilidad del microscopio metalúrgico puede ser ampliada debido a la incorporación de diversos aparatos auxiliares, como son los que permiten observar aspectos estructurales que no son visibles en condiciones normales.

Puesto que el ojo humano es insensible a las diferencias de fase, debe incorporarse al microscopio un aparato óptico especial.

Las diferencias de fases causados por variaciones extremadamente pequeñas al nivel de microestructuras, se transforman más tarde, en



diferencias de intensidad en la imagen observada, revelando de esta forma aspectos invisibles bajo iluminación ordinaria.

### **Óptica Normanski**

La óptica Nomarski u *Óptica de Contraste Interdiferencial* (DIC, por sus siglas en inglés) es una técnica de microscopía de luz que emplea filtros polarizantes y prismas para producir imágenes impresionantes con bastante tridimensionalidad. Este tipo de microscopía se caracteriza por su buena resolución y contraste que ayudan a discernir tanto detalles superficiales como estructuras internas. Además, el uso de prismas permite obtener imágenes de colores brillantes sin necesidad de aplicar protocolos de tinción, ni de preparación de muestras.

### **Examen micrográfico y macrografico.**

La forma mas sencilla de realizar el estudio, es examinando las superficies metálicas a simple vista, logrando determinar de esta forma las características macroscópicas. Este examen se denomina macrográfico y de ellos se extraen datos sobre los tratamientos mecánicos sufridos por el material, es decir, determinar si el material fue trefilado, laminado, forjado, entre otros, comprobar la distribución de defectos como grietas superficiales, de forja, rechupes, partes soldadas. Así mismo, los exámenes macroscópicos se realizan generalmente sin preparación especial, pero a veces es necesaria una cuidadosa preparación de la superficie para poner de manifiesto las características macroscópicas. En macroscopía, se utilizan criterios para el tipo de corte a realizar (transversal o longitudinal) para extraer la muestra dependiendo el estudio a realizar, por ejemplo:

- Corte transversal: Naturaleza del material, homogeneidad, segregaciones, procesos de fabricación, y otros.
- Corte longitudinal: Proceso de fabricación de piezas, tipo y calidad de la soldadura y otros.



Por otra parte, existe otro tipo de examen que es el examen micrográfico, que representa una técnica más avanzada y se basa en la amplificación de la superficie mediante instrumentos ópticos (microscopio) para observar las características estructurales microscópicas (microestructura).

Este tipo de examen permite realizar el estudio o controlar el proceso térmico al que ha sido sometido un metal, debido a que los mismos colocan en evidencia la estructura o los cambios estructurales que sufren en dicho proceso. Como consecuencia de ello también es posible deducir las variaciones que experimentan sus propiedades mecánicas (dependiendo de los constituyentes metalográficos presentes en la estructura). Los estudios ópticos microscópicos producen resultados que no solo son útiles a los investigadores sino también a los ingenieros.

El examen de la microestructura es muy útil para determinar si un metal o aleación satisface las especificaciones en relación a trabajos mecánicos anteriores, tratamientos térmicos y composición general. La microestructura es un instrumento para analizar las fallas metálicas y para controlar procesos industriales. Para un estudio de ella se necesita una preparación aún más cuidadosa de la superficie. No obstante el procedimiento de preparación de la superficie es básicamente el mismo para ambos ensayos metalográficos. Esta experiencia delinea una forma de preparar muestras pequeñas de acero blando) con el fin de realizar un examen metalográfico. Los pasos a seguir en el procedimiento de preparación son los mismos para todos los materiales difiriendo solo las herramientas de corte y el grado de finura de los papeles de esmeril según la dureza del material.

El reactivo de ataque a utilizar depende del tipo de aleación. Los ensayos micrográficos se realizan sobre muestras o probetas de los materiales que han de ser sometidos a estudio, preparamos una superficie que luego de ser pulida convenientemente, se ataca con reactivos químicos apropiados a la finalidad de la determinación a realizar.



Conociendo mejor el examen micrográfico:

Si el examen se ejecuta para analizar una fractura, la que se sospecha provocada por irregularidades en el material, las muestras deberán ser por lo menos dos, una de la propia fractura y otra de una zona intacta de la misma pieza, con el objeto de observar y comparar las modificaciones que ha sufrido la estructura y de las que se podrán deducir y contar con una mayor cantidad de datos, es necesario tener en cuenta además, los tratamientos recibidos por la pieza en su fabricación, como forjado, laminado, recocido, temple, entre otros; pues en muchos casos (forjado y laminado) es beneficio contar con muestras en las distintas direcciones de sus fibras.

Como se ha indicado, el estudio en si se hace sobre superficies convenientemente preparadas de dichas muestras o probetas. Esta preparación consiste en llegar a un pulido casi perfecto, para lo cual se parte de un desbaste que podríamos llamar grueso, con el fin de aplanar la superficie, lo que se consigue con un ajuste a lima o con el auxilio de devastadoras mecánicas de diseño especial. Los reactivos químicos y sus finalidades son muy variadas, pero en principio se busca con ellos la revelación, por coloración o por corrosión, de los distintos componentes de una estructura metalografica para poder diferenciarlos con facilidad. Por lo general, están constituidos por ácidos o álcalis diluidos en alcoholes, agua o glicerina. Y su elección se hará de acuerdo con la naturaleza química de la estructura a destacar en la muestra. Con tal fin, una vez pulida la superficie se hará en agua caliente, frotándola con un algodón o tela suave para quitarle todo rastro de las operaciones anteriores que pueda presentar, concluyendo esta limpieza con alcohol etílico o solvente similar y secándola con un soplado de aire caliente.

Las fotografías obtenidas de estos exámenes, genéricamente llamados "Microfotografías", se logran con la ayuda del microscopio metalográfico, cuyos principios ópticos y de observación no difieren mayormente de los comunes. En él, con iluminación adecuada, se observa por reflexión (los rayos luminosos al incidir sobre el objeto se refleja hacia el ocular), la imagen de la superficie atacada, a través de un sistema de lentes con los que se amplifica según lo que requiera la observación.





Por otra parte, con la observación de las estructuras micrográficas y por comparación con microfotografías, es posible deducir el contenido aparente de carbono, finura y variedad de los componentes, clasificación de aceros, reconocer las inclusiones por defectos de fabricación (óxidos, silicatos, oxisulfuros, silicoaluminatos).

### **Tamaño de grano de la matriz**

El tamaño de grano tiene un notable efecto en las propiedades mecánicas del metal. Los efectos del crecimiento de grano provocados por el tratamiento térmico son fácilmente predecibles. La temperatura, los elementos aleantes y el tiempo de impregnación térmica afectan el tamaño del grano.

En metales, por lo general, es preferible un tamaño de grano pequeño que uno grande. Los metales de grano pequeño tienen mayor resistencia a la tracción, mayor dureza y se distorsionan menos durante el temple, así como también son menos susceptibles al agrietamiento.

El grano fino es mejor para herramientas y dados. Sin embargo, en los aceros el grano grueso incrementa la endurecibilidad, la cual es deseable a menudo para la carburización y también para el acero que se someterá a largos procesos de trabajo en frío.

Todos los metales experimentan crecimiento de grano a altas temperaturas. Sin embargo, existen algunos aceros que pueden alcanzar temperaturas relativamente altas (alrededor de 1800 F o 982 C) con muy poco crecimiento de grano, pero conforme aumenta la temperatura, existe un rápido crecimiento de grano. Estos aceros se conocen como aceros de grano fino. En un mismo acero puede producirse una gama amplia de tamaños de grano.

### **Métodos para determinar el tamaño de grano.**

Una de las mediciones microestructurales cuantitativas más comunes es aquella del tamaño de grano de metales y aleaciones. Numerosos procedimientos han sido desarrollados para estimar el tamaño de grano, estos



procesos están sintetizados en detalle en la norma *ASTM E112*. Algunos tipos de tamaño de grano son medidos, tamaño de grano de la ferrita y tamaño de grano de la austenita. Cada tipo presenta problemas particulares asociados con la revelación de estos bordes de manera que puede obtenerse un rango exacto. Los principales métodos para la determinación del tamaño de grano recomendados por la ASTM (American Society for Testing and Materials) son:

- Método de Comparación
- Método de Planimétrico
- Método de Intersección

▪ *Método de comparación*

Mediante el método de prueba y error se encuentra un patrón que coincide con la muestra en estudio y entonces se designa el tamaño de grano del metal por el número correspondiente al número índice del patrón mixto; se tratan de manera semejante, en cuyo caso se acostumbra especificar el tamaño de granos en términos de dos números que denota el porcentaje aproximado de cada tamaño presente. El método de comparación es más conveniente y bastante preciso en muestras de granos de ejes iguales.

El número de tamaño de grano “n” puede obtenerse con la siguiente relación:

$$N=2 n -1$$

▪ *Método planimétrico*

Es el más antiguo procedimiento para medir el tamaño de grano de los metales. El cual consiste en que un círculo de tamaño conocido (generalmente 19.8 mm f, 5000 mm<sup>2</sup> de área) es extendido sobre una microfotografía o usado como un patán sobre una pantalla de proyección. Se cuenta el número de granos' que están completamente dentro del círculo n1 y el número de granos que interceptan el círculo n2 para un conteo exacto los granos deben ser marcados cuando son contados lo que hace lento este método.



#### ▪ *Métodos de intercepción*

El método de intercepción es más rápido que el método planimétrico debido a que la microfotografía o patrón no requiere marcas para obtener un conteo exacto. El tamaño de grano se estima contando por medio de una pantalla dividida de vidrio, o por fotomicrografía o sobre la propia muestra, el número de granos interceptados por una o más líneas rectas. Los granos tocados por el extremo de una línea se cuentan solo como medios granos. Las cuentas se hacen por lo menos entre posiciones distintas para lograr un promedio razonable. La longitud de líneas en milímetro, dividida entre el número promedio de granos interceptados por ella da la longitud de intersección promedio o diámetro de grano. El método de intersección se recomienda especialmente para granos que no sean de ejes iguales.

#### **3.2.3. Ensayo de dureza**

En metalurgia la dureza se mide utilizando un durómetro para el ensayo de penetración. Dependiendo del tipo de punta empleada y del rango de cargas aplicadas, existen diferentes escalas, adecuadas para distintos rangos de dureza.

El interés de la determinación de la dureza en los aceros estriba en la correlación existente entre la dureza y la resistencia mecánica, siendo un método de ensayo más económico y rápido que el ensayo de tracción, por lo que su uso está muy extendido.

Hasta la aparición de la primera máquina Brinell para la determinación de la dureza, ésta se medía de forma cualitativa empleando una lima de acero templado que era el material más duro que se empleaba en los talleres.

Las escalas de uso industrial actuales son las siguientes:

**Dureza Brinell:** Emplea como punta una bola de acero templado o carburo de W. Para materiales duros, es poco exacta pero fácil de aplicar. Poco precisa con chapas de menos de 6mm de espesor. Estima resistencia a tracción.



**Dureza Rockwell:** Se utiliza como punta un cono de diamante (en algunos casos bola de acero). Es la más extendida, ya que la dureza se obtiene por medición directa y es apto para todo tipo de materiales. Se suele considerar un ensayo no destructivo por el pequeño tamaño de la huella.

**Rockwell superficial:** Existe una variante del ensayo, llamada Rockwell superficial, para la caracterización de piezas muy delgadas, como cuchillas de afeitar o capas de materiales que han recibido algún tratamiento de endurecimiento superficial.

**Dureza Vickers:** Emplea como penetrador un diamante con forma de pirámide cuadrangular. Para materiales blandos, los valores Vickers coinciden con los de la escala Brinell. Mejora del ensayo Brinell para efectuar ensayos de dureza con chapas de hasta 2mm de espesor.

**Dureza Shore:** Emplea un escleroscopio. Se deja caer un indentador en la superficie del material y se ve el rebote. Es adimensional, pero consta de varias escalas. A mayor rebote -> mayor dureza. Aplicable para control de calidad superficial. Es un método elástico, no de penetración como los otros.

En el presente proyecto el ensayo de dureza utilizado es el ensayo de dureza Rockwell, a continuación se explica en que consiste dicho ensayo.

La **dureza Rockwell o ensayo de dureza Rockwell** es un método para determinar la dureza, es decir, la resistencia de un material a ser penetrado. El ensayo de dureza Rockwell viene determinado por la normativa UNE-EN ISO 6508. El ensayo de dureza Rockwell constituye el método más usado para medir la dureza debido a que es muy simple de llevar a cabo y no requiere conocimientos especiales. Se pueden utilizar diferentes escalas que provienen de la utilización de distintas combinaciones de penetradores y cargas, lo cual permite ensayar prácticamente cualquier metal o aleación.

Hay dos tipos de penetradores: unas bolas esféricas de acero endurecido (templado y pulido) de 1/16, 1/8, 1/4 y 1/2 pulg, y un penetrador cónico de diamante con un ángulo de  $120^\circ \pm 30'$  y vértice redondeado formando un casquete esférico de radio 0,20 mm (Braley), el cual se utiliza para los materiales más duros.



El ensayo consiste en disponer un material con una superficie plana en la base de la máquina. Se le aplica una precarga menor de 10 kg, básicamente para eliminar la deformación elástica y obtener un resultado mucho más preciso. Luego se le aplica durante unos 15 segundos un esfuerzo que varía desde 60 a 150 kg a compresión. Se desaplica la carga y mediante un durómetro Rockwell se obtiene el valor de la dureza directamente en la pantalla, el cual varía de forma proporcional con el tipo de material que se utilice. También se puede encontrar la profundidad de la penetración con los valores obtenidos del durómetro si se conoce el material.

Para no cometer errores muy grandes el espesor de la probeta del material en cuestión debe ser al menos diez veces la profundidad de la huella. También decir que los valores por debajo de 20 y por encima de 100 normalmente son muy imprecisos y debería hacerse un cambio de escala.

El cambio de escala viene definido por tablas orientativas, puesto que no es lo mismo analizar cobre que acero. Estas tablas proporcionan información orientativa sobre qué escala usar para no dañar la máquina o el penetrador, que suele ser muy caro.

### **3.3. IMPORTANCIA DE LA MICROESTRUCTURA EN FUNDICION NODULAR**

La microestructura de los metales es crítica para conocer su comportamiento frente a diferentes aplicaciones, por lo que es necesaria la caracterización de parámetros microestructurales. Por ejemplo el tamaño de grano se relaciona con el límite elasticidad.

En lo que concierne al presente proyecto, las fundiciones dúctiles, pueden considerarse como un material compuesto, donde la matriz de acero y los nódulos tienen un papel relevante en las propiedades mecánicas, dado que los nódulos son parte integral de la fundición, trabajando como “atenuadores de esfuerzos”, puesto que tienen propiedades diferentes a la matriz. De tal manera que deben estar presentes en la matriz de acero en una forma homogénea y en una cantidad específica, para obtener un óptimo de las propiedades



mecánicas. También, influye en las propiedades mecánicas tales como esfuerzos térmicos y mecánicos, resistencia al impacto, comportamiento a la fractura. En fundiciones de grafito compacto se pueden soportar mayores esfuerzos mecánicos y térmicos a partir del cambio de forma del grafito.

Actualmente las mediciones para el grafito y la tasa de nodularidad son mediciones cualitativas, ya que se dispone de cartas patrón, contra las que se compara la microestructura del material a analizar; esto hace que estas mediciones tengan un margen de error importante ya que dependerán de la percepción y criterio del evaluador.

Existen varios métodos para la determinación de la tasa de nodularidad, el método de JIS, el método ASTM A-247, el método AFS y el método de la SAE. Todos ellos tienen modelos patrón contra los que hay que hacer la comparación para determinar la nodularidad de la microestructura. Por ejemplo las cartas patrón de ASF, dan una precisión de  $\pm 10\%$ ; la norma ASTM caracteriza las partículas de grafito por número y letra en metalografías idealizadas para ser comparadas, permitiendo obtener un estimado de la distribución y tamaño de las partículas de grafito, lo cual no es confiable para controlar procesos donde la nodularidad es un factor crítico, como en la fundición de monoblocks de motores.

## **4. MARCO PRÁCTICO**

### **4.1. EQUIPOS Y MATERIALES.**

Para el desarrollo experimental del proyecto se han utilizado los equipos y materiales de la escuela universitaria de ingeniería técnica industrial, más concretamente del laboratorio del departamento de ciencia de los materiales e ingeniería metalúrgica.



## Equipos

Los equipos utilizados en el laboratorio son los siguientes:

- Corte del material
  - o Cortadora de corte refrigerado
- Pulido
  - o Pulidora de velocidad variable.
  - o Papel abrasivo N° 600, 800 y 1200.
  - o Alúmina.
- Horno eléctrico.
- Microscopio metalográfico AXIOVERT 200- ZEISS.
- Durometro.

## Materiales

El material utilizado para la realización del presente proyecto es un cilindro de una fundición de grafito esferoidal y matriz ferrítica en estado de bruto de colada, suministrado por el proveedor.

Este material objeto de estudio está designado como EN-GJS-HB185 en la norma UNE-EN 1563 [1] para fundición de grafito esferoidal.

Otros materiales utilizados son productos químicos como óxido de aluminio en suspensión acuosa (alúmina) y Nital.

## 4.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL (PROCEDIMIENTOS)

### 4.2.1. Metalografía

#### 1. Preparación de las muestras

Se parte de un cilindro de fundición nodular en bruto, como se necesitan 13 muestras se calcula el espesor de cada rebanada que es de aproximadamente 1.5 cm, suficiente para los análisis que se van a realizar.



El cilindro en bruto es cortado con una cortadora metalográfica que es un equipo capaz de cortar con un disco especial de corte por abrasión, mientras suministra un gran caudal de refrigerante (taladrina), evitando así el sobrecalentamiento de la muestra. De este modo, no se alteran las condiciones microestructurales de la misma.

Se cortan 13 rebanadas del suministro de fundición nodular, las muestras serán utilizadas para:

- 1 Rebanada: análisis del material suministrado por proveedor.
- 3 Rebanadas:  $T = 850^{\circ}\text{C}$  y  $t_{\text{solubilización}} = 1\text{h}$ :
  - Aire
  - Agua
  - Horno
- 3 Rebanadas:  $T = 850^{\circ}\text{C}$  y  $t_{\text{solubilización}} = 4\text{h}$ :
  - Aire
  - Agua
  - Horno
- 3 Rebanadas:  $T = 1000^{\circ}\text{C}$  y  $t_{\text{solubilización}} = 1\text{h}$ :
  - Aire
  - Agua
  - Horno
- 3 Rebanadas:  $T = 1000^{\circ}\text{C}$  y  $t_{\text{solubilización}} = 4\text{h}$ :
  - Aire
  - Agua
  - Horno

## 2. Preparación muestras horno y tratamiento térmico

De las trece muestras cortadas solo doce son sometidas a tratamientos térmicos dado que una se guardara como muestra del suministro. Las muestras se introducen de tres en tres en el horno y cada una de estas, una vez realizado el calentamiento a la temperatura correspondiente ( $1000^{\circ}\text{C}$  o  $850^{\circ}\text{C}$ ) y una vez pasado el tiempo de solubilización correspondiente (1 hora o 4

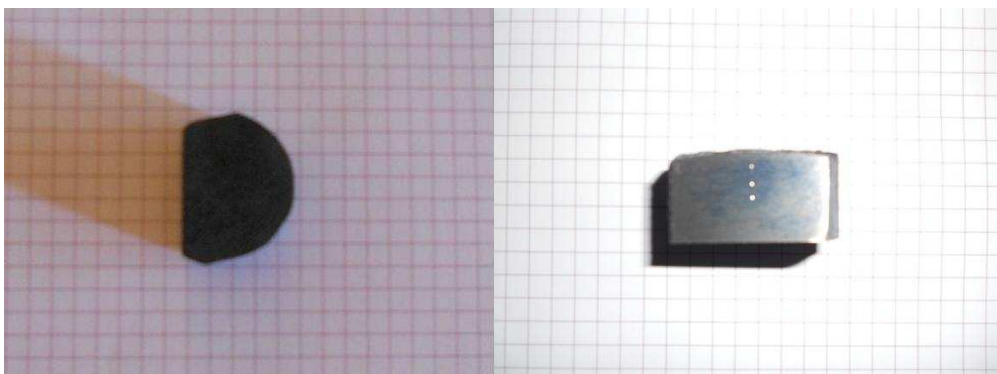




horas), se abre el horno rápido y se saca una para enfriamiento en aire, otra se enfriara rápido en un cubo con agua previamente preparado y la ultima se dejara en el horno para enfriamiento en horno.

### 3. Preparación de la superficie a analizar

Como la superficie que ha quedado para analizar no es la mas adecuada se realizara un segundo corte, en la cortadora metalografica, paralelo al eje de la rebanada cilíndrica que a quedado, así se tendrá un mejor apoyo para cuando se realice el ensayo de dureza correspondiente. En dicho corte se realizara el pulido y posterior análisis en microscopio metalográfico. El corte realizado se muestra en la siguiente imagen:



Para conseguir una superficie mas adecuada se usa el equipo desbastadora y pulidora metalográfica, se prepara la superficie del material, en su primera fase denominada Desbaste Grueso, donde se desbasta la superficie de la muestra con papel de lija, de manera uniforme y así sucesivamente disminuyendo el tamaño de grano (Nº de papel de lija) hasta llegar al papel de menor tamaño de grano (lijas **P600, P800, P1200**). Una vez obtenido el último pulido, con el papel de lija de tamaño de grano más pequeño, se realiza la segunda fase.

Al inicio de la segunda fase de pulido denominada Desbaste Fino, en la que se requiere de una superficie plana libre de ralladuras la cual se obtiene mediante una rueda giratoria húmeda cubierta con un paño especial cargado



con partículas abrasivas cuidadosamente seleccionadas en su tamaño para ello existen gran posibilidad de abrasivos para efectuar el ultimo pulido (**ALUMINA**); en tanto que muchos harán un trabajo satisfactorio parece haber preferencia por la gama de óxidos de aluminio para pulir materiales ferrosos . Una vez que la superficie esta lista, se guarda la muestra envuelta en papel y en una bolsa para evitar que la superficie se llene de impurezas y así no tener problemas para posteriormente observarla en el microscopio metalográfico.

### Ataque químico

Hay una enormidad de ataques químicos, para diferentes tipos de metales y situaciones. En general, el ataque es hecho por inmersión o fregado con algodón embebido en el líquido escogido por la región a ser observada, durante algunos segundos hasta que la estructura o defecto sea revelada. Uno de los más usados es el NITAL, (ácido nítrico y alcohol), para la gran mayoría de los metales ferrosos, que es el que se utilizara en el presente proyecto. Las características a tener en cuenta, del nital, son las siguientes:

REACTIVO	COMPOSICION	OBSERVACIONES
<b>Nital</b>	2 a 5% de ácido nítrico en alcohol metílico.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Obscurece la perlita en aceros al carbono</li><li>• Diferencia la perlita de la martensita: revela los límites de grano de la ferrita, muestra la profundidad del núcleo en los aceros nitrurados.</li><li>• Tiempo: 5 a 60 segundos</li></ul>

Para preparar las muestras se uso nital, se vierten unas gotas en la superficie a analizar y se deja actuar unos segundos debido a que el nital oscurece mucho la perlita y en las muestras en que la perlita se encuentre en gran proporción podría afectar a la imagen tomada en microscopio



metalográfico, a continuación se limpia la superficie con agua y se seca con papel.

### **Microscopia**

Para la realización del examen metalográfico se uso un microscopio metalográfico AXIOVERT 200- ZEISS con optica normal y optica Normanski, con cámara digital y monitor TFT para covisualización y documentación científica, con el cual es posible examinar una muestra con aumentos que varían entre 50 y 1000. El microscopio metalográfico, debido a la opacidad de los metales y aleaciones, opera con la luz reflejada por el metal. Por lo que para poder observar la muestra es necesario preparar una probeta y pulir a espejo la superficie, como se realizo anteriormente.

Una vez preparadas la superficie de las muestras se visualiza en el microscopio tomando las imágenes más adecuadas para posteriormente analizar la microestructura, una vez analizadas sin atacar se procederá a atacar químicamente la superficie con nital y se volverán a visualizar en el microscopio, obteniendo así las imágenes que interesan.

Utilizaremos óptica normal y óptica Normanski con la que se observara una superficie con gran contraste y nitidez y con relieve.

Una vez se realizo el examen metalográfico las muestras se guardan en bolsas identificadas, para saber de que muestra se trataba cuando se haga el ensayo de dureza.

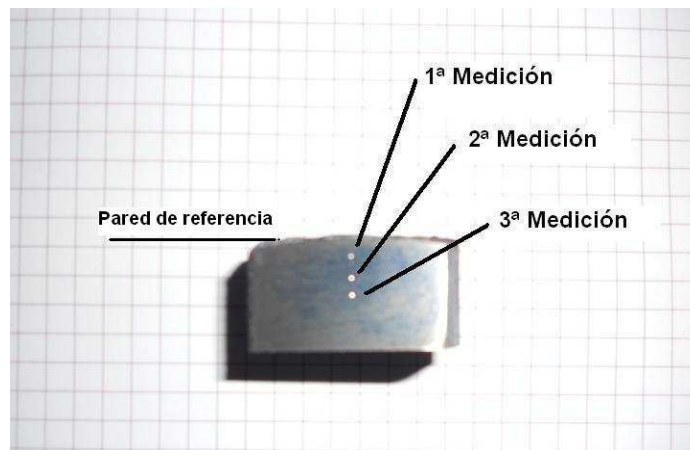
#### **4.2.2. Ensayo de dureza**

El ensayo de dureza Rockwell esta especificado en la norma UNE-EN ISO 6508, en dicha norma nos explica las cargas, penetradores y los procedimientos que se deben de seguir para la realización del ensayo.

Los ensayos de dureza se realizaron sobre las 13 muestras utilizadas en el ensayo metalográfico. Se realizaron tres medidas en cada muestra, una en el centro de la muestra y las otras dos cada una mas cerca de la pared lateral de la muestra.



Las medidas quedan aclaradas en la fotografía siguiente:



Se utilizaron dos tipos de escalas para el análisis de la dureza dependiendo del tipo de tratamiento térmico realizado, las escalas para los ensayos de durezas fueron las siguientes:

#### **Muestras obtenidas mediante enfriamiento en agua (temple)**

Para dichas muestras se utilizó el método de análisis de dureza Rockwell C. Se utilizó dicho método debido a la gran dureza que presentan las muestras enfriadas en agua. Se utilizó una punta cónica de diamante y una carga de 150Kg (1471N) durante un tiempo de 15 segundos. La escala utilizada fue la escala C.

El ensayo fue realizado, en cada una de las cuatro muestras, en tres sitios distintos del centro hacia fuera, cuyas medidas se muestran en el cuadro de los datos obtenidos en durometro.

#### **Muestra del suministro y muestras obtenidas mediante enfriamiento en aire (normalizado) y en horno (recocido)**

Para dichas muestras se utilizó el método de análisis de dureza Rockwell B. Se utilizó dicho método debido a que estas muestras al tener microestructura ferrítico-perlítica no tienen excesiva dureza por lo que la escala que más se adecuaba a dichas muestras es la Rockwell B.



Se utilizo una bola de acero templado de 1/16 de pulgada o 1,5875 mm y una carga de 100 Kg (980,7N) durante un tiempo de 15 segundos. La escala utilizada fue la escala B o roja.

El ensayo fue realizado, en cada una de las nueve muestras (cuatro enfriamiento horno, cuatro enfriamiento aire y una de suministro), en tres sitios distintos del centro hacia la periferia de la muestra.

Una vez realizado el ensayo de dureza para las 13 muestras se tomo las medidas exactas donde fueron hechas las tres medidas de cada muestra, tomando como referencia la pared lateral.

## **5. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

Los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio se detallan a continuación, junto con su análisis y discusión.

### **5.1 ENSAYO DUREZA ROCKWELL**

Como se mostró anteriormente en la imagen la toma de la medida de dureza en las muestras se realizo en tres lugares al azar, cada uno mas alejado del lateral, debido a que lo que interesa es hacer la dureza en tres sitios distintos de la muestra y posteriormente sacar un promedio. Después de hacer el ensayo de dureza se toman las medidas de los tres puntos donde se realizo dicho ensayo, dichas medidas se muestran a continuación.

<b>850°C-1hora</b>	<b>1ª Medida (mm)</b>	<b>2ª Medida (mm)</b>	<b>3ª Medida (mm)</b>
Temple	2,3	4	6
Normalizado	2,9	5	6,5
Recocido	2,5	4	6
<b>850°C-4horas</b>	<b>1ª Medida (mm)</b>	<b>2ª Medida (mm)</b>	<b>3ª Medida (mm)</b>
Temple	2	3,1	4
Normalizado	2,7	5,6	8
Recocido	3,3	4,8	6,8



1000°C-1hora	1ª Medida (mm)	2ª Medida (mm)	3ª Medida (mm)
Temple	2,3	3,7	5,6
Normalizado	2,7	4,5	6,3
Recocido	2,2	3,7	5,4
1000°C-4horas	1ª Medida (mm)	2ª Medida (mm)	3ª Medida (mm)
Temple	2,8	3,5	6
Normalizado	2,5	3,9	5,5
Recocido	2,7	4,6	5,7

### Valores obtenidos en el durómetro

A continuación se muestran los resultados del ensayo de dureza Rockwell y las graficas que comparan las durezas obtenidas en los distintos tratamientos térmicos realizados, la muestra del suministro se ha introducido en cada grafica de los tratamientos térmicos, para así comparar en grafica la modificación en la dureza que se ha producido con la realización del respectivo tratamiento térmico.

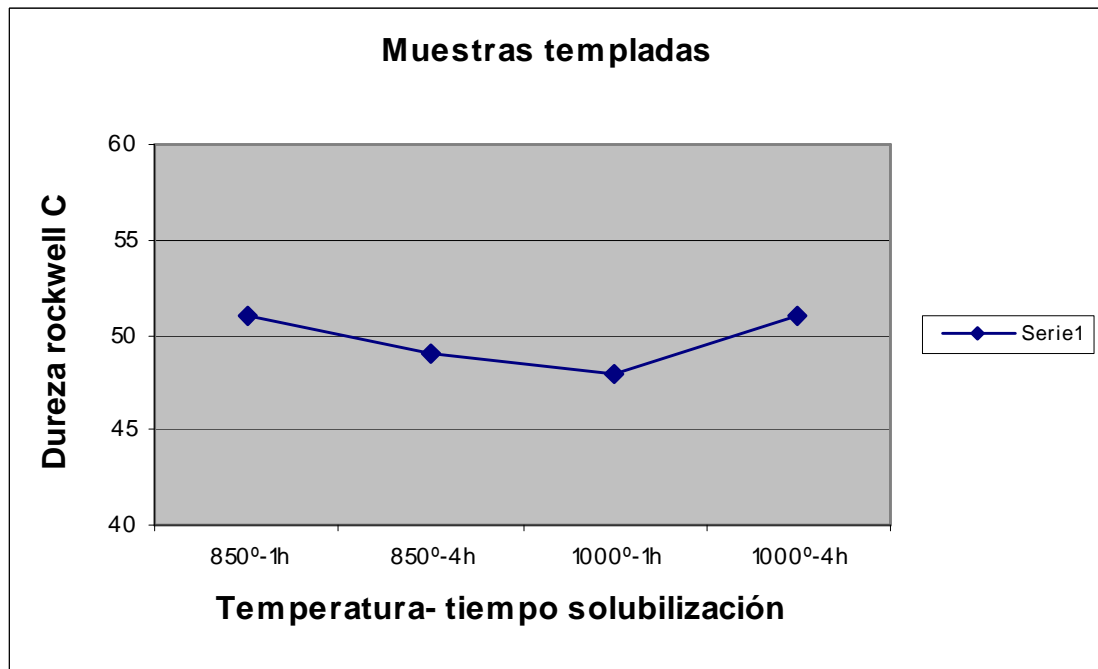
### Muestra suministro

Muestra	1medición (HRB)	2medición (HRB)	3ª medición (HRB)	PROMEDIO (HRB)
Suministro	84	88	89	87

### Muestra obtenidas mediante enfriamiento en agua (temple):

Muestra Tª-t <sub>solubilizacion</sub>	1medición (HRC)	2medición (HRC)	3ª medición (HRC)	PROMEDIO (HRC)
850º-1h	50	51	51	51
1000º-1h	44	53	46	48
850º-4h	44	52	52	49
1000º-4h	68	45	39	51



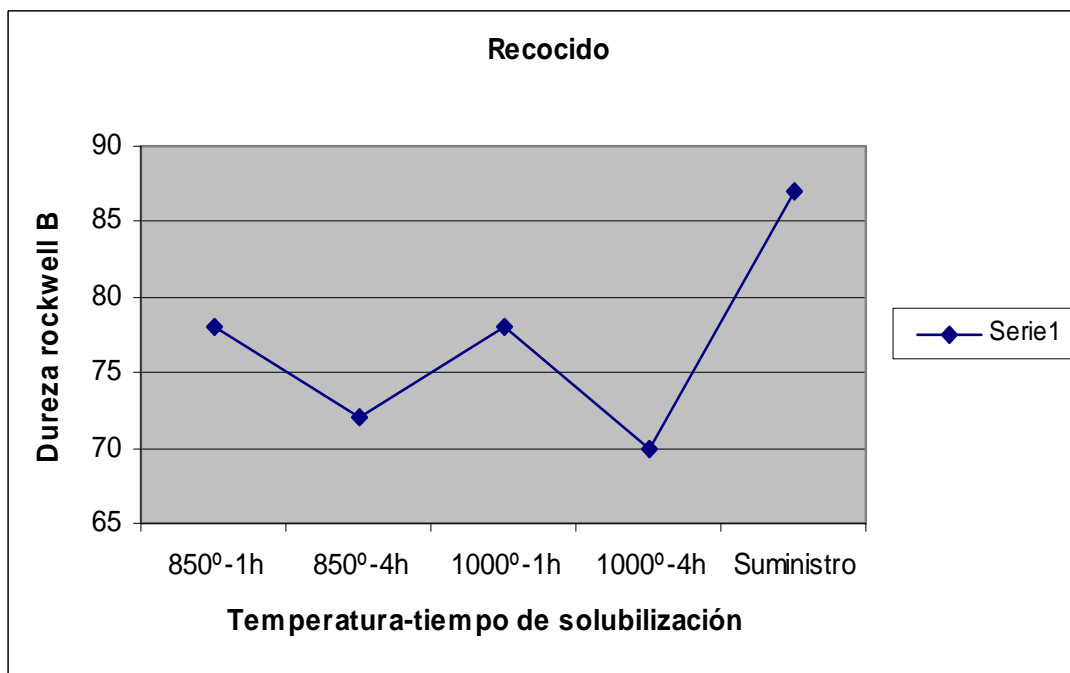


**Grafica 1. Comportamiento de la dureza en templado a distintas temperaturas y tiempos de solubilización.**

**Muestras obtenidas mediante enfriamiento en horno (recocido):**

Muestra	1medición (HRB)	2medición (HRB)	3ª medición (HRB)	PROMEDIO (HRB)
850°-1h	74	80	79	78
1000°-1h	73	80	81	78
850°-4h	65	76	74	72
1000°-4h	65	73	70	70





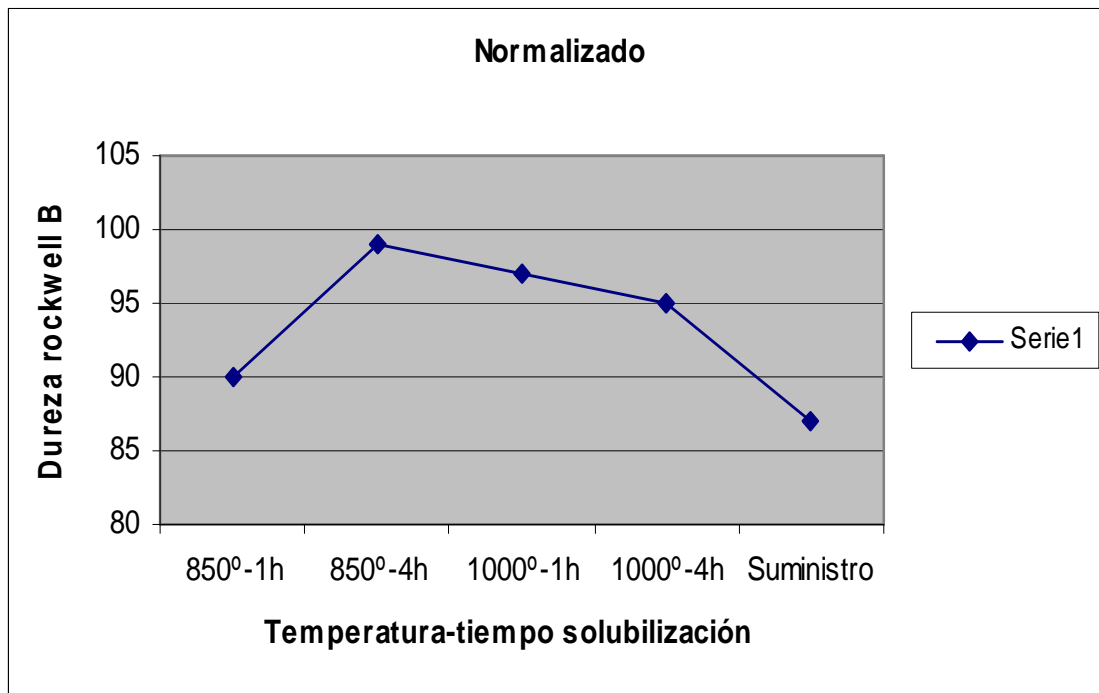
**Grafica 2. Comportamiento de la dureza en recocido, a distintas temperaturas y tiempos de solubilización, y suministro material.**

**Muestras obtenidas mediante enfriamiento en aire (normalizado):**

Muestra	1medición (HRB)	2medición (HRB)	3ª medición (HRB)	PROMEDIO (HRB)
850°-1h	75	97	99	90
1000°-1h	94	100	98	97
850°-4h	96	102	100	99
1000°-4h	111	93	82	95







**Grafica 3. Comportamiento de la dureza en normalizado, a distintas temperaturas y tiempos de solubilización, y suministro material.**

### **Discusión resultados de ensayo dureza Rockwell**

Una vez obtenidas las medidas en el ensayo de dureza Rockwell se procedió a compararlos con la muestra que se guardo como suministro. En el temple se alcanza una gran dureza por lo que la dureza no se pudo realizar con escala Rockwell B por lo que se realizo con escala Rockwell C. Como se puede observar en la siguiente tabla los valores que hemos obtenido en los ensayos de dureza Rockwell B y Rockwell C no se pueden comparar debido a la diferencia de dureza que existe entre templado y los demas tratamientos termicos.



VICKERS HV	BRINELL HB	ROCKWELL					
		HRB	HRC	HRA	HR45N	HR30N	HR15N
100	95	56					
120	114	67					
140	133	75					
160	152	82					
180	171	87					
200	190	92					
220	209	95					
240	228	98					
260	247	101					
280	265	104					
300	284	106	29.8	65.2	31.1	50.2	74.9
320	303	107	32.2	66.4	33.9	52.3	76.2
340	322	108	34.4	67.6	36.5	54.4	77.4
360	341	109	36.6	68.7	39.1	56.4	78.6
380	360	110	38.8	69.8	41.7	58.4	79.8
400	379		40.8	70.8	44.1	60.2	81.0
420	397		42.7	71.8	46.4	61.9	81.8
440	415		44.5	72.8	48.4	63.5	82.8
460	433		46.1	73.6	50.4	64.9	83.6
480	448		47.7	74.5	52.2	66.4	84.3
500			49.1	75.3	53.9	67.7	85.0
520			50.5	76.1	55.6	69.0	85.7
540			51.7	76.7	57.0	70.0	86.3
560			53.0	77.4	58.6	71.2	86.9
580			54.1	78.0	59.9	72.1	87.5
600			55.2	78.6	61.2	73.2	88.0
620			56.3	79.2	62.4	74.2	88.5
640			57.3	79.8	63.5	75.1	89.0
660			58.3	80.3	64.7	75.9	89.5
680			59.2	80.8	65.7	76.8	89.8

En la grafica 1, que corresponde a las cuatro muestras templadas, se puede observar en la grafica como los valores de dureza apenas tienen gran variación por consiguiente se puede decir que la temperatura y tiempo de solubilización empleados no tienen gran influencia en los valores de dureza obtenidos en el templado de las muestras de fundición nodular. En la grafica 2, que corresponde a las cuatro muestras recocidas, se puede observar como la dureza es menor que en la muestra de suministro y como en este tipo de tratamiento térmico si se muestra una variación de la dureza en las muestras, dicha variación esta relacionada con el tiempo de solubilización dado que al aumentar el tiempo disminuye el valor de la dureza. También se observa como el cambio de temperatura no afecta en gran medida a la dureza.



*En la grafica 3, que corresponde a las muestras que han sido sometidas a tratamiento térmico de normalizado, se puede observar como la dureza de las muestras tratadas por dicho tratamiento térmico es mayor que la dureza obtenida en la muestra suministro y como en este tipo de tratamiento térmico los valores de la dureza aunque varían entre si, no existe una correlación entre los valores de dureza obtenidos y la variación de temperatura y tiempo de solubilización.*

Las posibles causas de lo anteriormente mencionado sobre las tres graficas se comentaran en el siguiente punto mientras se observan las micrografías, debido a que las diferencias en los valores de dureza entre los distintos tipos de tratamientos térmicos están relacionadas con las características de la microestructura.

En la tabla de las medidas de los puntos donde se realizo el ensayo de dureza de cada muestra se observa que los valores de dureza en cada medición de una misma muestra resultan distintos, esto es debido a la heterogeneidad en la microestructura de las fundiciones con grafito libre, por lo que se realizo un promedio de entre las tres tomas de medida de cada muestra.

## **5.2. METALOGRAFIA**

Una vez realizado la preparación de las muestras se paso a la toma de imágenes que se mostraran a continuación, conforme veamos las imágenes se ira comparando los valores de la dureza con dichas imágenes para así saber a que se debe el aumento o disminución de la dureza.

### **5.2.1 Muestra suministro (sin tratamiento térmico).**

Una vez se cortaron las muestras en la cortadora metalografica se guardo una muestra, dicha muestra no iba a ser tratada térmicamente dado que era la muestra que nos indicaría las especificaciones del material suministrado por el proveedor.



La muestra a la que denominamos muestra suministro fue analizada en el microscopio y cuyas imágenes se muestran a continuación:

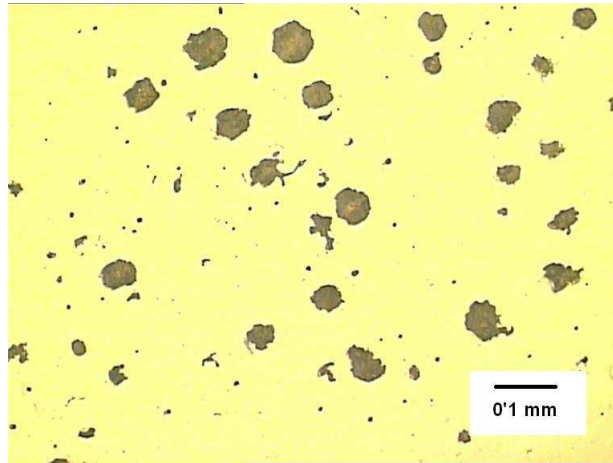


Figura 5-1: Micrografía de la muestra sin tratar térmicamente, sin atacar superficie y a 100 aumentos.

En la imagen anterior se puede ver que se trata de una fundición de grafito esferoidal, debido a que el grafito se encuentra en forma de nódulos, encontrándose con formas tanto bien redondeadas como algo degeneradas. El tamaño de los nódulos **no es homogéneo** y se puede observar como algunos nódulos se encuentran degenerados.

A continuación se observa una micrografía de fundición nodular atacada con nital (figura 5-2), dicha imagen nos muestra que los nódulos de grafito están distribuidos sobre una **matriz ferrítico-perlítica**. Las zonas oscuras son la perlita que se rebela al ser atacada con nital. Como se observa en la imagen la cantidad de perlita y ferrita está aproximadamente al 50%. La ferrita se encuentra alrededor de los nódulos de grafito. En las zonas donde se encuentra la perlita alejadas de los nódulos de grafito, por ser las últimas en solidificar, la segregación producida durante la solidificación, favorece la presencia de elementos promotores de perlita.



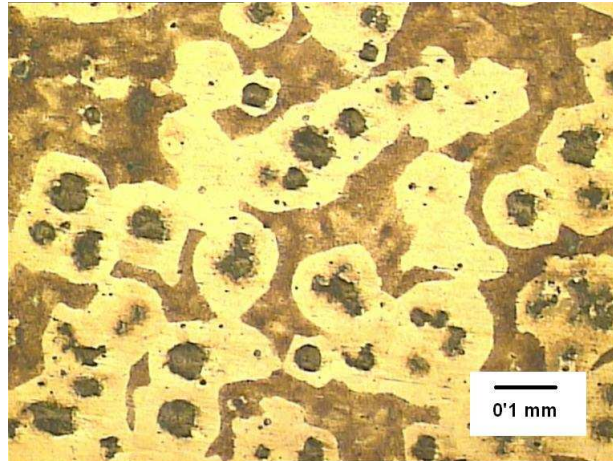


Figura 5-2: Micrografía de la muestra sin tratar térmicamente, atacada con nital y a 100 aumentos.

En la figura 5-3 se observa una micrografía que fue tomada utilizando óptica Normanski, en ella se puede observar un grano de grafito con gran nitidez.



Figura 5-3: Micrografía sin tratar térmicamente, sin ataque químico y a 500 aumentos, óptica Normanski.

El valor promedio obtenido en el ensayo de dureza Rockwell B para la muestra suministro es  $HRB = 87$ , dicho valor se utilizará comparándolo con la dureza obtenida en los distintos tratamientos térmicos y así saber como influyen los distintos microconstituyentes obtenidos en dichos tratamientos térmicos, dicho valor como se dijo anteriormente no se podrá comparar con el temple debido a que su valor se obtuvo mediante dureza Rockwell C por su gran dureza.





### **5.2.2 Muestras tratadas térmicamente a $T^a=850^{\circ}\text{C}$ .**

Seis muestras se han tratado térmicamente a una temperatura de  $850^{\circ}\text{C}$  durante unos tiempos de solubilización de una hora y cuatro horas, las imágenes obtenidas mediante microscopia optica se muestran a continuación.

#### **5.2.2.1 Tiempo de solubilización 1horas.**

##### **Enfriamiento en agua (temple).**

Una muestra una vez terminado el tiempo de solubilizacion de 1 hora a  $850^{\circ}\text{C}$  es enfriada en agua, las imágenes tomadas son las que se muestran a continuación.

Se aprecia en la figura 5-4, como en la muestra suministro, que la distribución de los granos de grafito no es homogenea y que hay granos degenerados, como sucedia en la muestra de suministro.

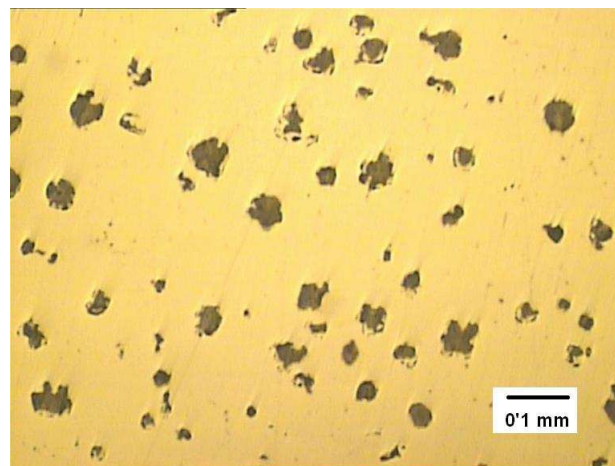


Figura 5-4: Micrografías tratadas térmicamente (templado), sin ataque químico y a 100 aumentos.

En la figura 5-5 se muestran dos micrografías sin atacar, son la misma micrografía pero una observada por óptica Normanski. Como se observa en la imagen la óptica de Normanski nos muestra una imagen más nítida y una cierta profundidad de campo.



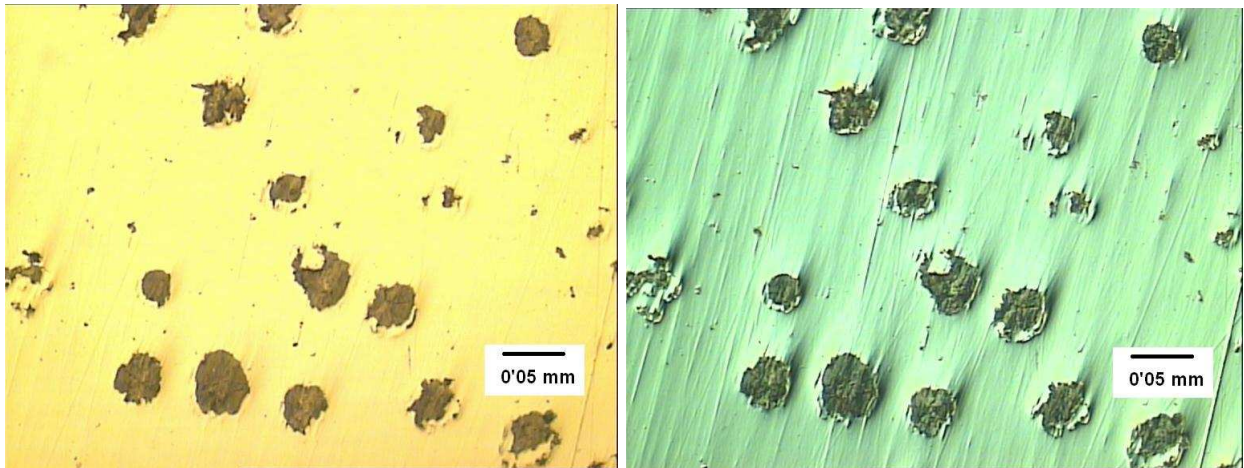


Figura 5-5: Micrografías tratadas térmicamente (templado), sin ataque químico y a 200 aumentos. Izquierda lente normal, derecha lente NORMANSKY.

En la figura 5-6 la muestra ha sido atacada con nital, se puede observar en la imagen como la matriz es totalmente oscura lo que es debido a la aparición de martensita. La matriz del temple es una **matriz martensítica**.

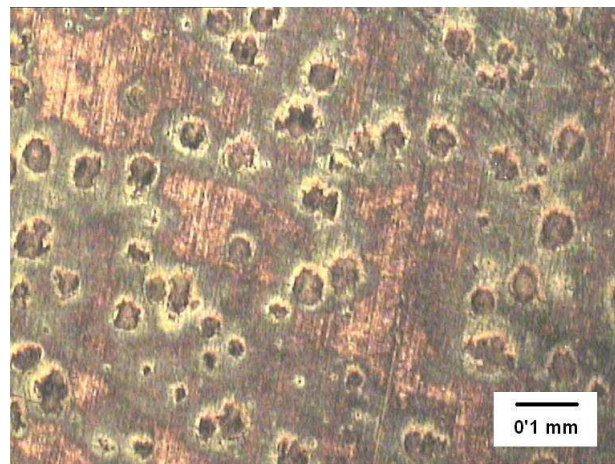


Figura 5-6: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (templado), atacada con nital y a 100 aumentos.

En la figura 5-7 se puede observar las agujas de martensita que se han formado, aunque no con gran nitidez. Las agujas de martensita son de tamaño pequeño. Dichas agujas de martensita se encuentran en la matriz entrecruzadas entre si.



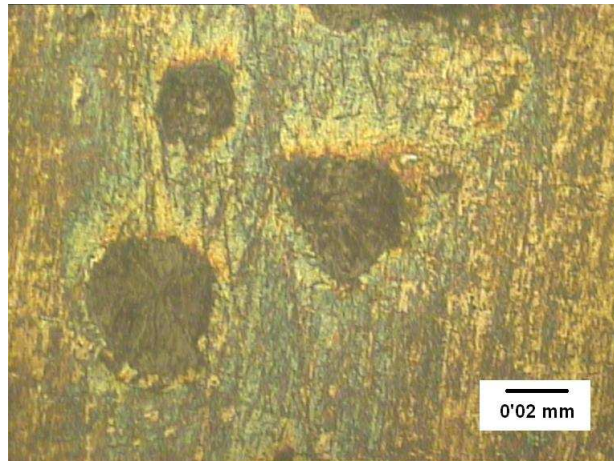


Figura 5-7: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (templado), atacada con nital y a 500 aumentos.

El valor de la dureza Rockwell C obtenido es  $HRC = 51$ , es junto a  $1000^{\circ}\text{C}$ -4 horas la más alta, aunque la diferencia entre los distintos temple es mínima por lo que se considerara que la diferencia se puede despreciar.

#### Enfriamiento en aire (normalizado).

Una muestra una vez terminado el tiempo de solubilización de 1 hora a  $850^{\circ}\text{C}$  es enfriada en aire, las imágenes tomadas son las que se muestran a continuación.

En la figura 5-8 se observa una micrografía sin atacar y con optica Normanski, en ella se observa los nodulos de grafito, unos con gran nodularidad y otros degenerados al igual que en las anteriores muestras.





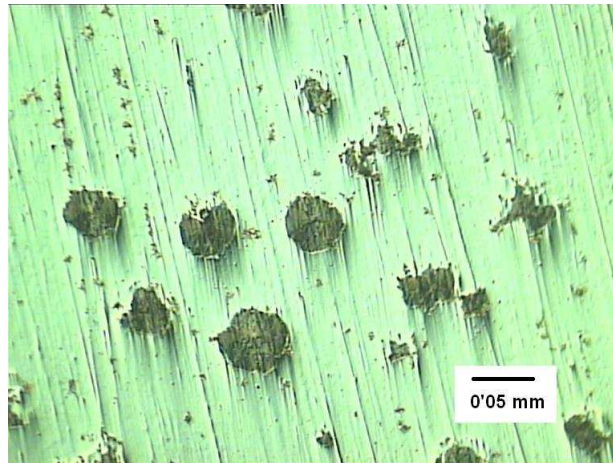


Figura 5-8: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (normalizado), sin ataque químico y a 200 aumentos, optica Normanski.

En las imágenes de la figura 5-9 se observa que la cantidad de perlita ha aumentado considerablemente en detrimento de la ferrita, debido al normalizado, en una **matriz ferrítico-perlítica**. La figura 5-9 derecha fue tomada con optica Normanski, en ella se ve con mayor claridad como la ferrita se encuentra distribuida en la perlita.

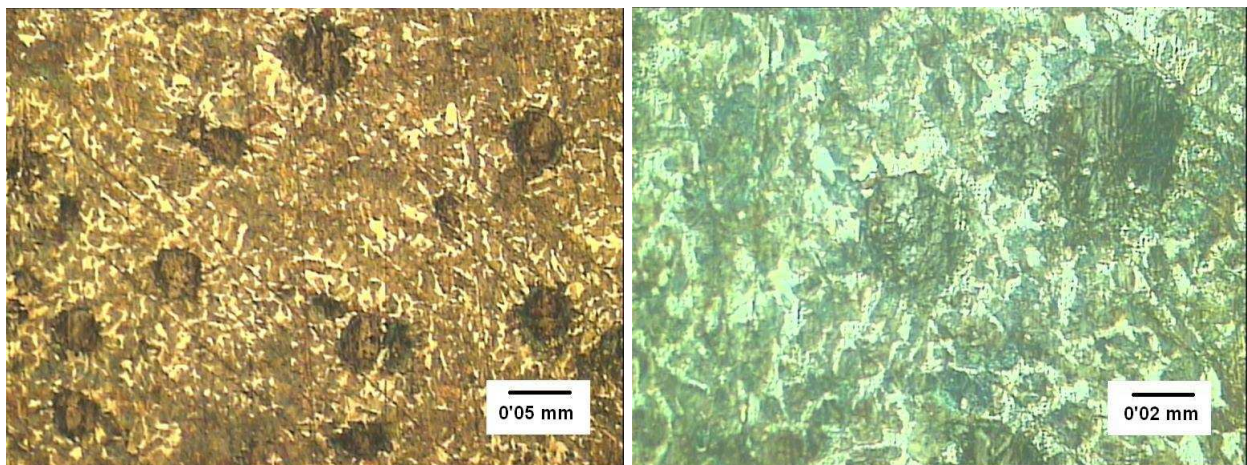


Figura 5-9: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (normalizado), atacada con nital. Izquierda 200 aumentos, derecha 500 aumentos y óptica Normanski.

La dureza obtenida en este tratamiento térmico es el valor más bajo, HRB=90, de todos los normalizados que hemos realizado. Esto puede ser debido a que la cantidad de ferrita obtenida, aunque es baja, es más elevada que en los demás tratamientos térmicos. El normalizado a 850°C durante una hora presenta menos perlita que en el mismo tratamiento a cuatro horas.



Enfriamiento en horno (recocido).

Una muestra una vez terminado el tiempo de solubilización de 1 hora a 850°C es enfriada en horno, las imágenes tomadas son las que se muestran a continuación.

En la figura 5-10 se observa una micrografía de fundición nodular sin ataque químico y con una cantidad elevada de nodulos de grafito, debido a el proceso de recocido cuya finalidad es obtener una matriz con la mayor cantidad de ferrita posible para mejorar la ductilidad.

En esta imagen se puede observar que, al contrario que en el suministro, el temple y el normalizado, existe una distribución y tamaño más homogénea de los granos de grafito, aunque no se modifica demasiado. También se observa como la cantidad de nódulos de grafito ha aumentado.

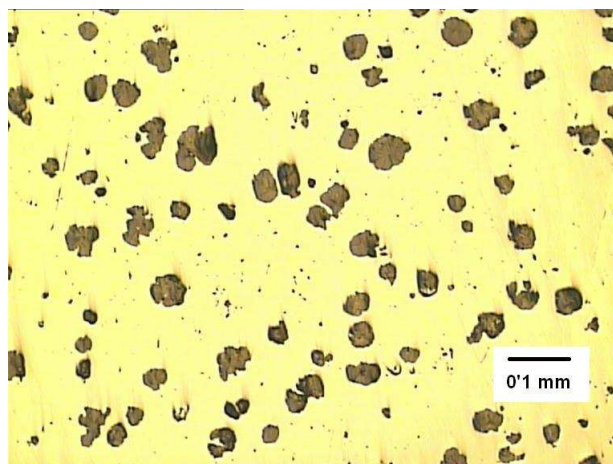


Figura 5-10: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (recocido), sin ataque químico y a 100 aumentos.

En la figuras 5-11 y 5-12 se muestra, una vez atacada la muestra con nital, como la cantidad de perlita se encuentra en poca cantidad respecto a la ferrita en la matriz ferrítico-perlítica.





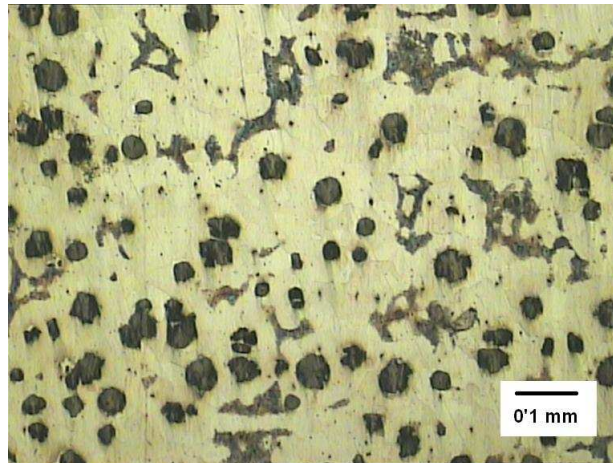


Figura 5-11: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (recocido), atacada con nital y a 100 aumentos.

En la figura 5-12 se observan con gran nitidez los límites de grano de la matriz, así como la poca perlita que hay en la matriz. También se puede observar como la perlita se encuentra alejada de los nódulos de grafito como se explicó anteriormente.

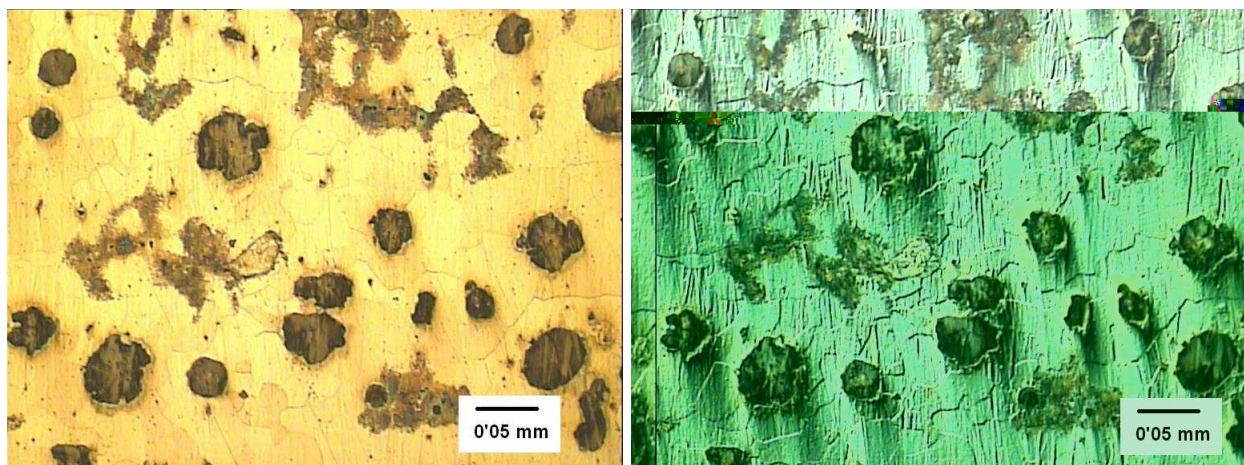


Figura 5-12: Micrografías tratadas térmicamente (recocido), atacadas con nital y a 200 aumentos. Izquierda: óptica normal, derecha: óptica NORMANSKY.

En la figura 5-13 se ven los límites de grano de la matriz y también se puede ver la perlita.



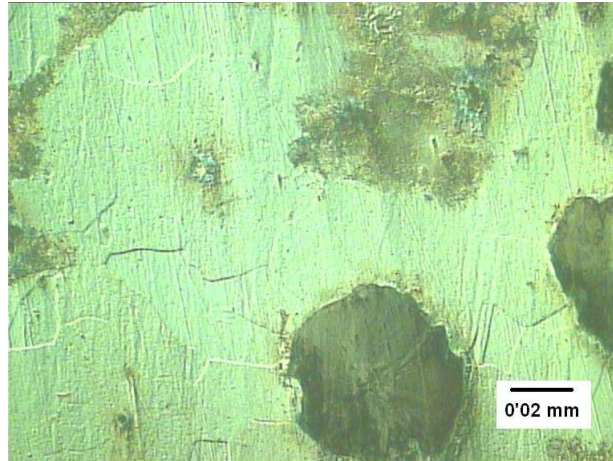


Figura 5-13: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (recocido), atacada con nital y a 500 aumentos, lente Normansky.

La dureza obtenida en este tratamiento térmico, HRB=78, es menor que la de los tratamientos térmicos de temple y normalizado y también menor que la muestra suministro. La baja dureza se debe a que la cantidad de ferrita es mucho mayor que la cantidad de perlita en la matriz, la ferrita es el microconstituyente más dúctil de todos los que vamos a visualizar, dado que la finalidad del recocido es aumentar la ductilidad y tenacidad. Dentro de las muestras recocidas, está es junto a la muestra 1000°C-1hora la más elevada, esto es debido a que en tiempo de solubilización de 1 hora no avanza la siguiente reacción de la misma manera que en 4 horas:



#### 5.2.2.2 Tiempo de solubilización 4 horas.

##### Enfriamiento en agua (templado).

Una muestra una vez terminado el tiempo de solubilización de 4 horas a 850°C es enfriada en agua, las imágenes tomadas son las que se muestran a continuación.



En la figura 5-14 se observa como existe una menor cantidad de granos degenerados que en el temple anterior (850°C-1hora), aunque se sigue viendo que la distribución de los nodulos sigue siendo no homogenea.

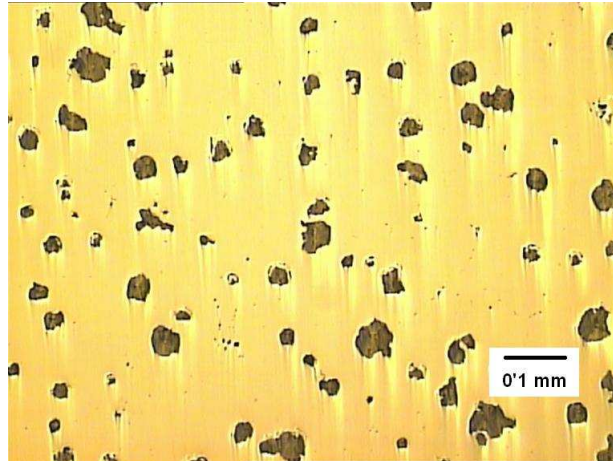


Figura 5-14: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (temple), sin ataque y a 100 aumentos.

Una vez atacada la muestra con nital podemos observar en la figura 5-15 como la poca ferrita se encuentra alrededor de los granos de grafito y el resto de la matriz es martensita. Matriz martensítica.

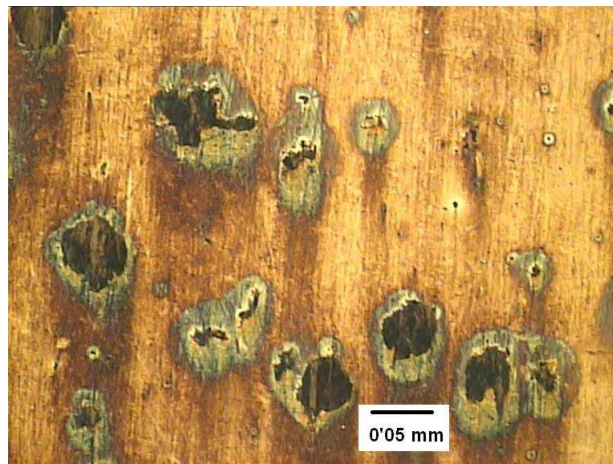


Figura 5-15: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (temple), atacada con nital y a 200 aumentos.

En las figuras 5-16 y 5-17 se pueden ver la martensita en forma de agujas cruzadas, cuyas agujas se ven con mayor nitidez que en temple anterior (850°C-1hora).





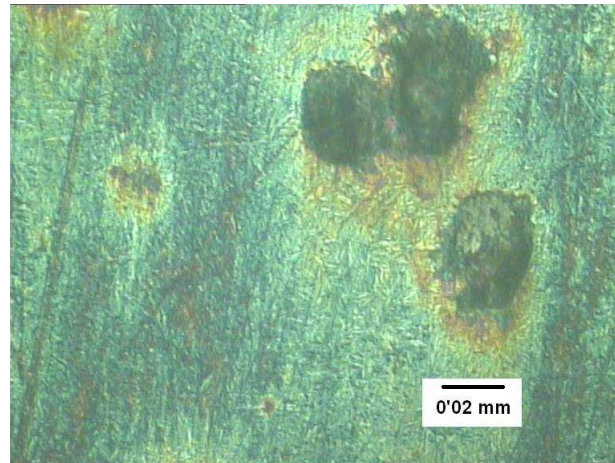


Figura 5-16: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (temple), atacada con nital y a 500 aumentos.

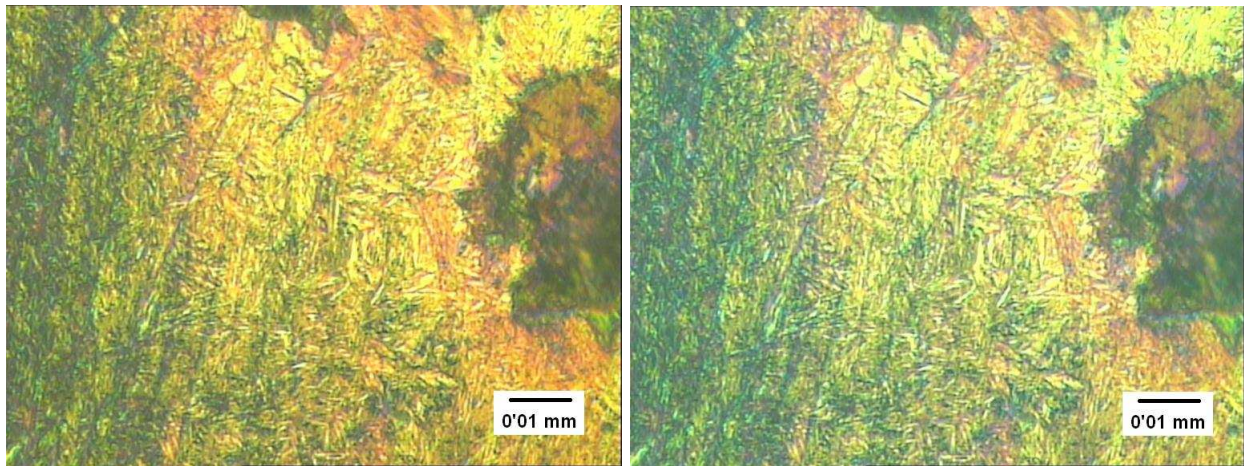


Figura 5-17: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (temple), atacada con nital y a 1000 aumentos, derecha con lente Normansky.

El valor de la dureza Rockwell C obtenido es HRC= 49, muy parecida a los demás temple realizados.

#### Enfriamiento en aire (normalizado).

Una muestra una vez terminado el tiempo de solubilización de 4 horas a 850°C es enfriada en aire, las imágenes tomadas son las que se muestran a continuación.

En la figura 5-18 se puede observar como el normalizado logra conseguir una estructura con granos de grafito de menor tamaño y distribución



mas homogénea, y mayor nodularidad que en el normalizado con tiempo de solubilización de 1 hora.

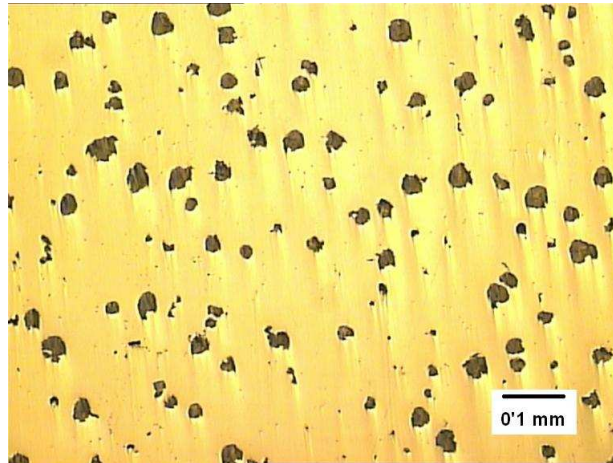


Figura 5-18: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (normalizado), sin ataque y a 100 aumentos.

En la figura 5-19 y 5-20 se muestra como la matriz queda totalmente formada por perlita con poca ferrita distribuida por la matriz de ferrítico-perlítica como sucedía en tiempo de solubilización 1 hora, también se puede observar que la cantidad de ferrita ha disminuido.

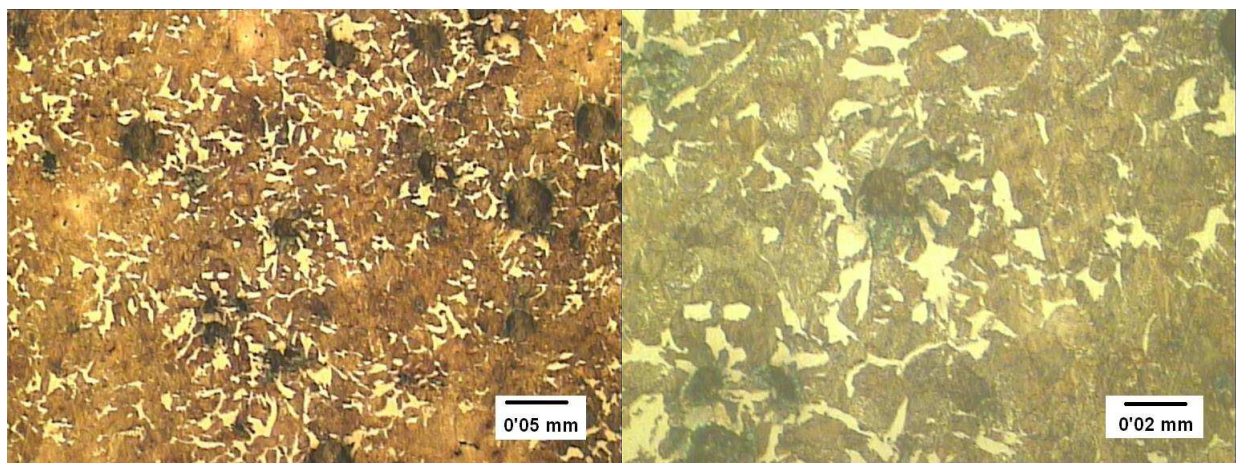


Figura 5-19: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (normalizado), atacada con nital, izquierda 200 aumentos y derecha 500 aumentos.





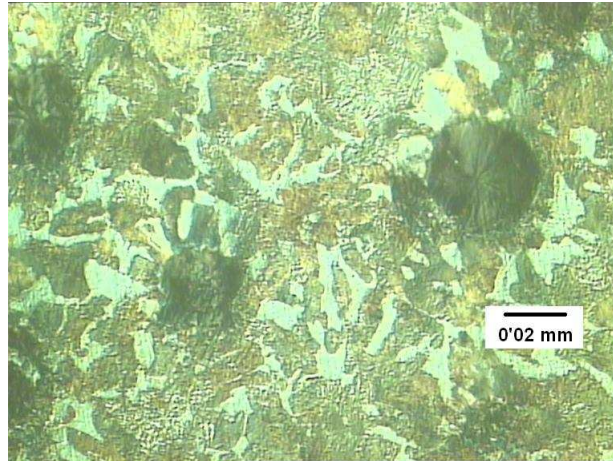


Figura 5-20: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (normalizado), atacada con nital y a 500 aumentos.

En la figura 5-21 podemos observar como la perlita se encuentra en forma laminar.

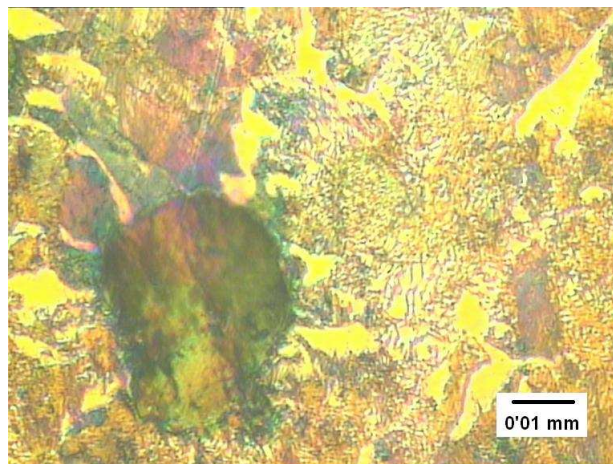


Figura 5-21: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (normalizado), atacada con nital y a 1000 aumentos, lente Normansky.

La dureza obtenida en este tratamiento térmico es el valor más alto, HRB=99, de todos los normalizados que hemos realizado aunque la diferencia con 1000°C a una hora y 4 horas es mínima. Su elevada dureza se debe a que la cantidad de perlita formada es elevada, si se comparan las micrografías entre esta muestra y la muestra 850°C-1hora se observa como la cantidad de perlita formada es mayor en este normalizado, de ahí la diferencia de dureza.





La diferencia de dureza también es debido a una distribución del grafito más homogénea, así como un tamaño de grano más homogéneo.

#### Enfriamiento en horno (recocido).

Una muestra una vez terminado el tiempo de solubilización de 4 horas a 850°C es enfriada en horno, las imágenes tomadas son las que se muestran a continuación.

En la figura 5-22 se observa como la distribución de los granos de grafito no es homogénea y como el tamaño es muy variable. En comparación con las anteriores tratamientos hay menos cantidad de grafito y el tamaño es mayor, y mas aun en comparación con el recocido a tiempo de solubilización de 1 hora.

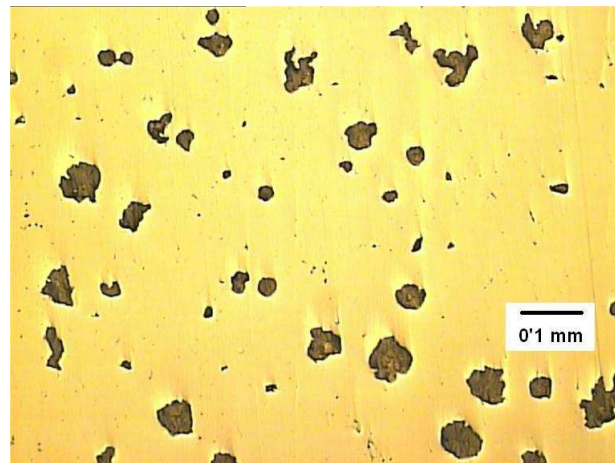


Figura 5-22: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (recocido), sin ataque y a 100 aumentos.

En las figuras 23 y 24 se muestra una vez atacada la muestra con nital como la perlita se encuentra en menor cantidad que la ferrita. Es una matriz ferrítico-perlítica con mayor cantidad de perlita que en tiempo de solubilización 1 hora.



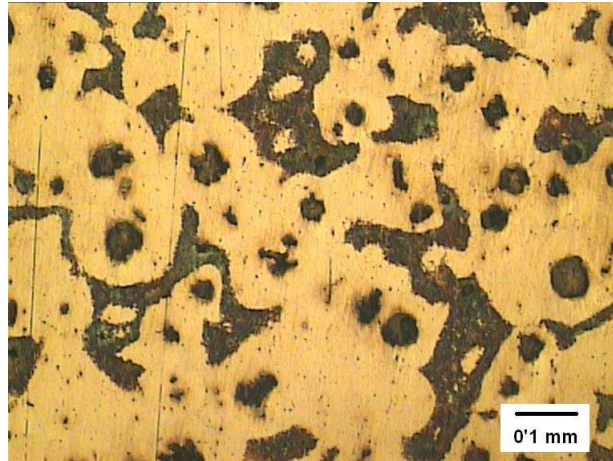


Figura 5-23: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (recocido), atacada con nital y a 100 aumentos.

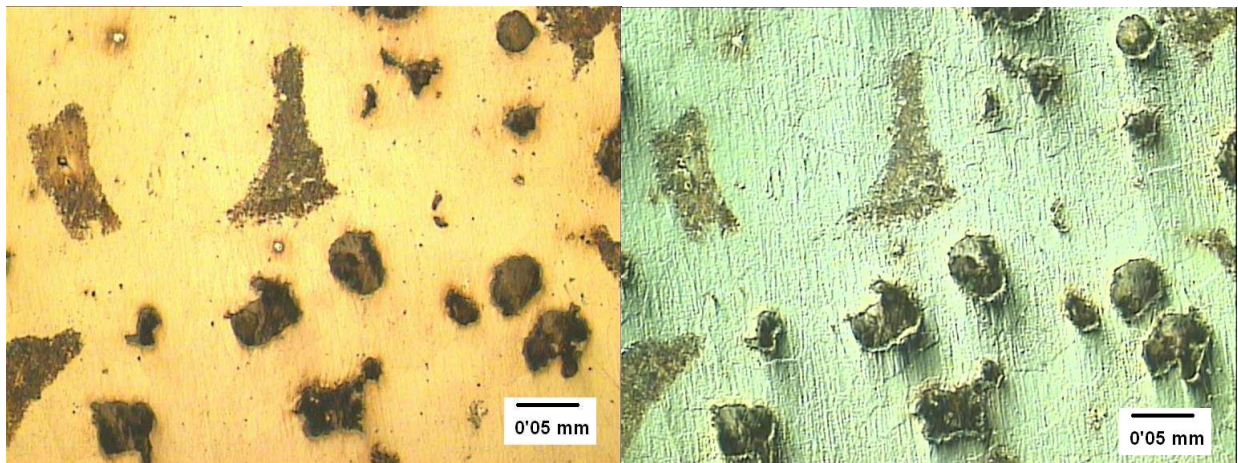


Figura 5-24: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (recocido), atacada con nital y a 200 aumentos, derecha lente Normansky.

En la figura 5-25 se observa como la perlita se encuentra en forma globular, esto es significativo porque anteriormente hemos visto como la perlita se encontraba en forma laminar.



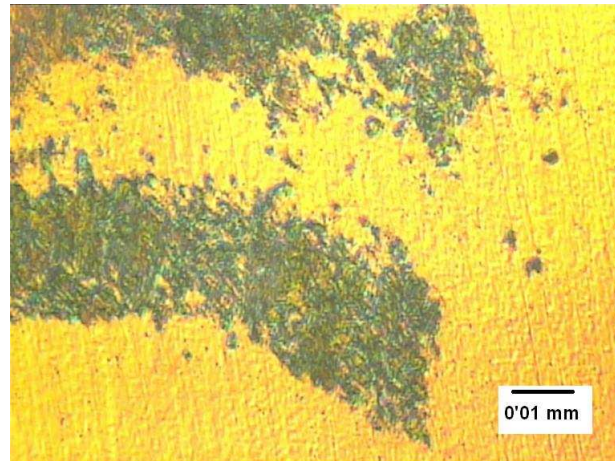


Figura 5-25: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (recocido), atacada con nital y a 1000 aumentos, lente Normansky.

La dureza obtenida en este tratamiento térmico, HRB=72, es menor que la de los tratamientos térmicos de temple y normalizado y también menor que la muestra suministro. Aunque la cantidad de perlita es mayor que en tiempo de solubilización de 1 hora el valor de dureza es menor, esto puede ser debido a una distribución y tamaño de los nódulos de grafito menos homogéneo.

La baja dureza se debe a que la cantidad de ferrita es mucho mayor que la cantidad de perlita en la matriz. Se favorece la siguiente reacción:



### **5.2.3 Muestras tratadas térmicamente a Tª=1000°C.**

Seis muestras se han tratado térmicamente a una temperatura de 1000°C durante unos tiempos de solubilización de una hora y cuatro horas, las imágenes obtenidas mediante microscopía óptica se muestran a continuación.

#### **5.2.3.1 Tiempo de solubilización 1 horas.**

Enfriamiento en agua (temple).





Una muestra una vez terminado el tiempo de solubilización de 1 hora a  $1000^{\circ}\text{C}$  es enfriada en agua, las imágenes tomadas son las que se muestran a continuación.

En la figura 5-26 se observa que los nodulos de grafito se encuentran en su mayoría degenerados y con una distribución y tamaño no homogéneos.

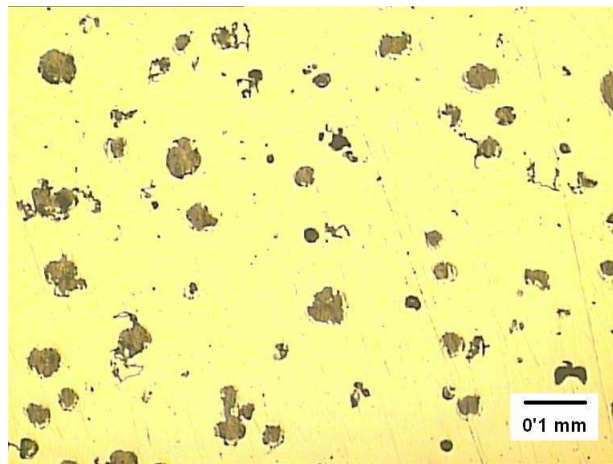


Figura 5-26: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (temple), sin ataque y a 100 aumentos.

En las micrografías 27 y 28 se puede observar como después de realizar el temple la matriz es totalmente martensítica. En dichas imágenes se ven las agujas de martensita con poca claridad y como se encuentran entrecruzadas.

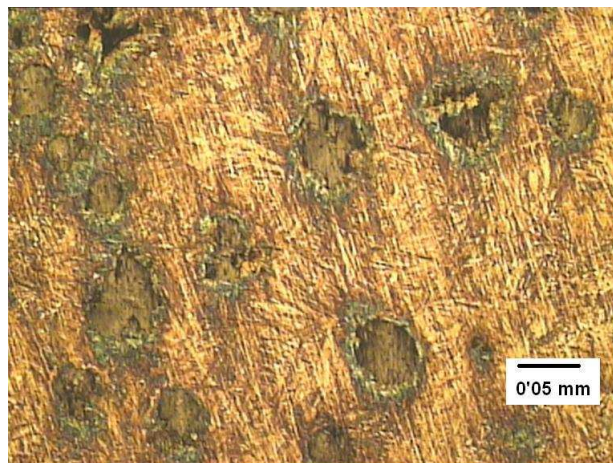


Figura 5-27: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (temple), atacada con nital y a 200 aumentos.



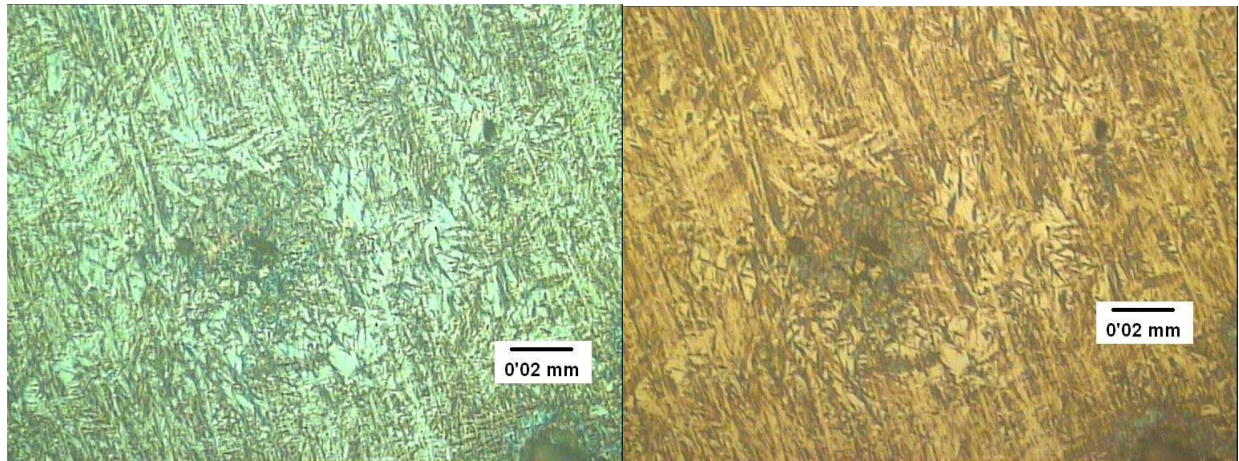


Figura 5-28: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (temple), atacada con nital y a 500 aumentos, izquiera óptica Normansky.

En la figura 5-29 a 1000 aumentos se observa un grano con gran nodularidad y como alrededor de dicho nódulo se encuentran agujas de martensita de tamaño pequeño. También se puede observar, como se dijo anteriormente, el crecimiento de grano radial.

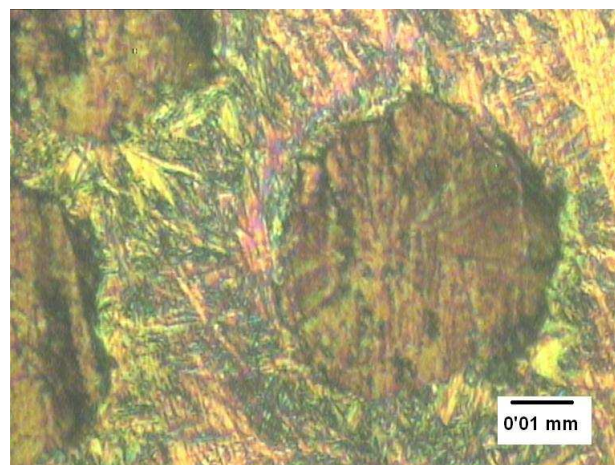


Figura 5-29: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (temple), atacada con nital y a 1000 aumentos, óptica Normansky.

La dureza Rockwell C obtenida en este temple es HRC=48, como se dijo anteriormente no se compararan las durezas de los temple debido a que la diferencia se puede despreciar.



Enfriamiento en aire (normalizado).

Una muestra una vez terminado el tiempo de solubilización de 1 hora a 1000°C es enfriada en aire, las imágenes tomadas son las que se muestran a continuación.

En la figura 30 se observan unas rayas que son debidas a que el paño húmedo, donde se realiza el pulido fino, se encontraba en malas condiciones por lo que se tuvo que cambiar para no tener malas interpretaciones de las micrografías. En dicha imagen se observa como hay poca nodularidad debido a granos degenerados y cuya distribución y tamaño es bastante homogéneo.

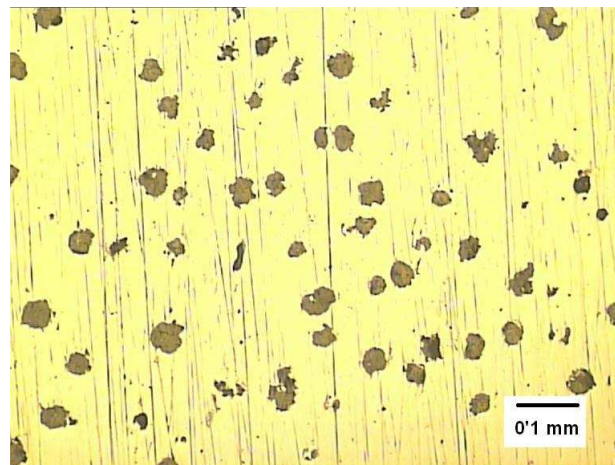


Figura 5-30: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (normalizado), sin ataque y a 100 aumentos.

En las figuras 31 y 32 se observa, una vez atacada la muestra, como se trata de una matriz ferrítica-perlítica con muy poca cantidad de ferrita respecto a la perlita. En los normalizados a 850°C la ferrita se encuentra distribuida en la matriz, pero a continuación se observa como a 1000°C la poca ferrita que hay esta alrededor de los nodulos de grafito formando lo denominado “ojos de buey”, esto hace que la matriz sea más homogénea y facilite un mejor análisis de ensayos.





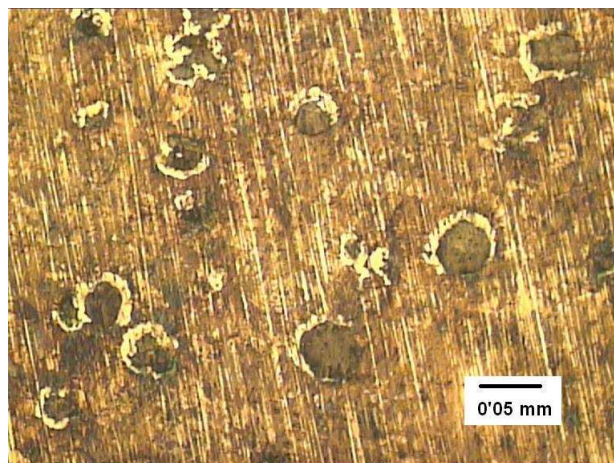


Figura 5-31: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (normalizado), atacada con nital y a 200 aumentos.

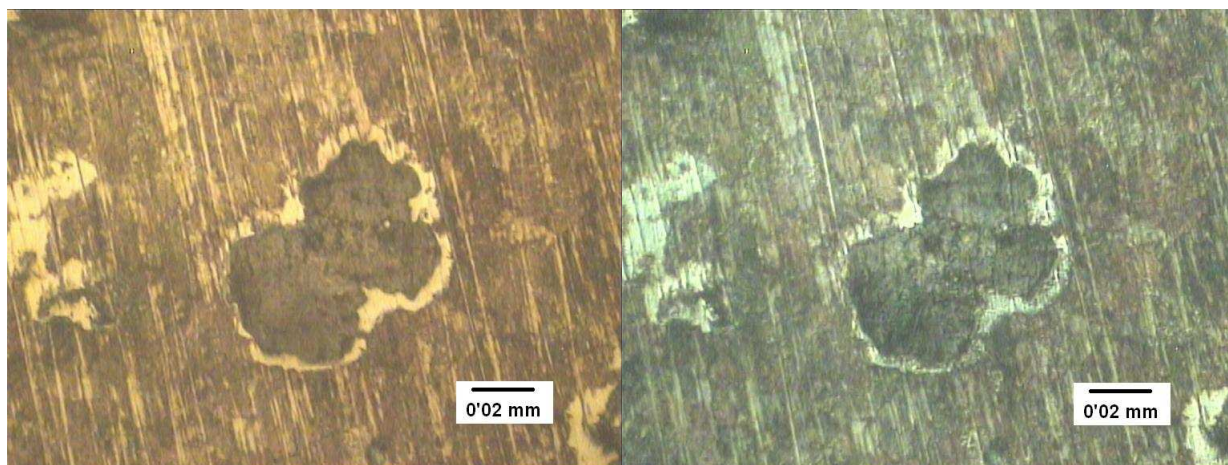


Figura 5-32: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (normalizado), atacada con nital y a 500 aumentos, derecha óptica Normansky.

En la figura 33 se observan los granos de la matriz aunque no con gran nitidez.



Figura 5-33: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (normalizado), atacada con nital y a 500 aumentos, óptica Normansky.



La dureza obtenida en este tratamiento térmico, HRB=97, es más elevado que en normalizado 850°C-1hora y prácticamente igual que en los otros normalizados. Su elevada dureza se debe a que la cantidad de perlita formada es elevada, si se comparan las micrografías entre esta muestra y la muestra 850°C-1hora se observa como la cantidad de perlita formada es mayor en este normalizado y como la poca ferrita que hay esta alrededor de los nódulos, de ahí la diferencia de dureza. Esta diferencia de dureza se debe también a una distribución del grafito más homogénea, así como un tamaño más homogéneo.

#### Enfriamiento en horno (recocido).

Una muestra una vez terminado el tiempo de solubilización de 1 hora a 1000°C es enfriada en horno, las imágenes tomadas son las que se muestran a continuación.

En la figura 34 se observa una micrografía con una cantidad elevada de nodulos de grafito. En esta imagen se puede observar que al contrario que en el suministro y el temple existe una distribución mas homogenea de los granos de grafito y mayor nodularidad. No existe en los nodulos gran diferencia con el normalizado.

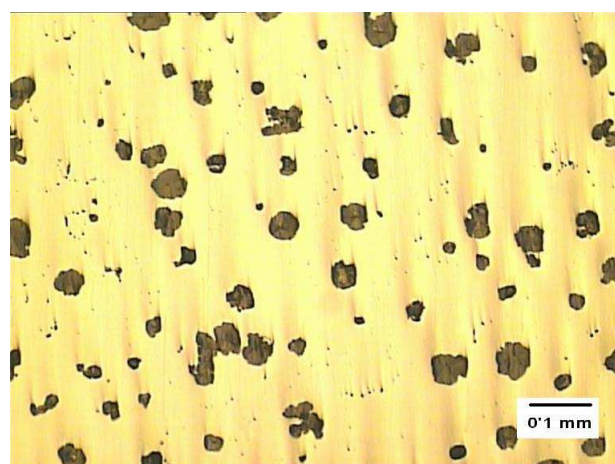


Figura 5-34: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (recocido), sin ataque y a 100 aumentos.





Un vez se ataca la superficie de la muestra, figura 5-35, se observa en la micrografía una matriz ferrítico-perlítica con muy poca cantidad de perlita distribuida en la matriz.

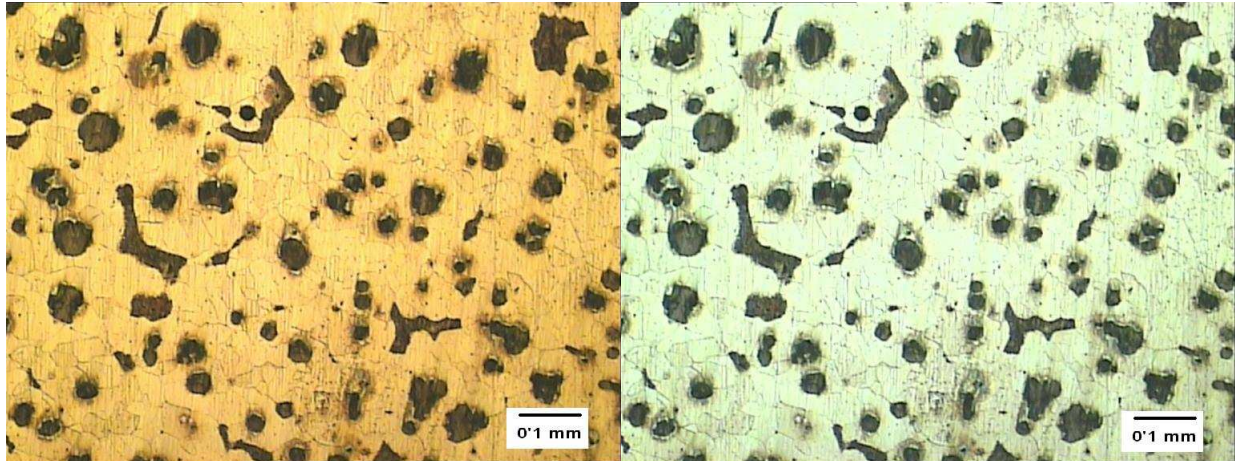


Figura 5-35: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (recocido), atacada con nital y a 100 aumentos.

En la figura 36 se observan los limites de grano de la matriz ferrítica con gran nitidez.

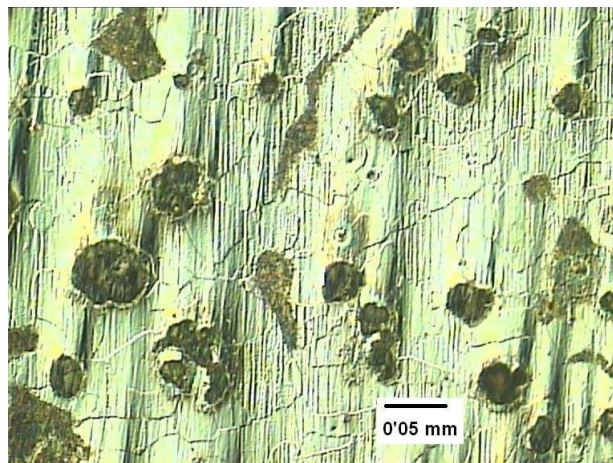


Figura 5-36: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (recocido), atacada con nital y a 200 aumentos, óptica Normansky.



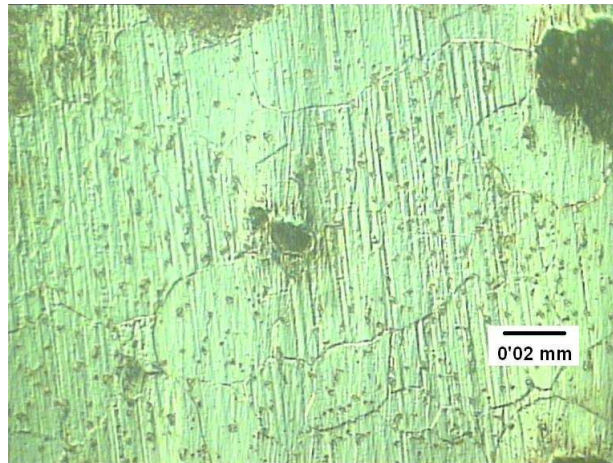


Figura 5-37: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (recocido), atacada con nital y a 500 aumentos.

En las figuras 38 y 39 observamos como la perlita se encuentra en láminas por lo que podemos decir que se trata de perlita laminar.

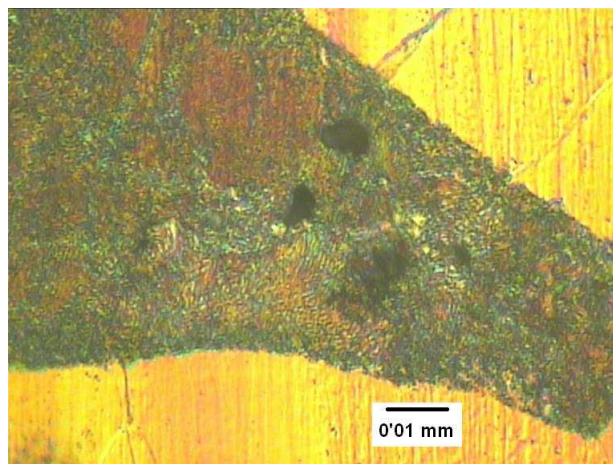


Figura 5-38: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (recocido), atacada con nital y a 1000 aumentos.



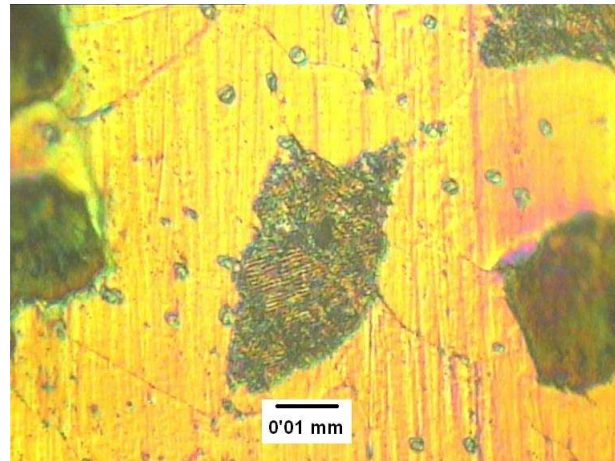


Figura 5-39: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (recocido), atacada con nital y a 1000 aumentos.

La dureza obtenida en este tratamiento térmico, HRB=78, es menor que la de los tratamientos térmicos de temple y normalizado y también menor que en la muestra suministro. La baja dureza se debe a que la matriz es ferrítica. Dentro de las muestras recocidas, está es junto a la muestra 850°C-1 hora la más elevada. Aunque la cantidad de perlita es menor que en tiempo de solubilización de 4 horas, la dureza mas elevada como se dijo anteriormente se debe a una distribución y tamaño de los nódulo de grafito mas homogénea.

#### 5.2.3.2 Tiempo de solubilización 4 horas.

##### Enfriamiento en agua (templado).

Una muestra una vez terminado el tiempo de solubilización de 4 horas a 1000°C es enfriada en agua, las imágenes tomadas son las que se muestran a continuación.

En la figura 40 se observa una micrografía con una cantidad elevada de nodulos de grafito. En esta imagen se puede observar, al contrario que en temple con tiempo de solubilización de 1 hora, existe una distribución más homogénea de los granos de grafito y mayor nodularidad, así como un tamaño más homogéneo.





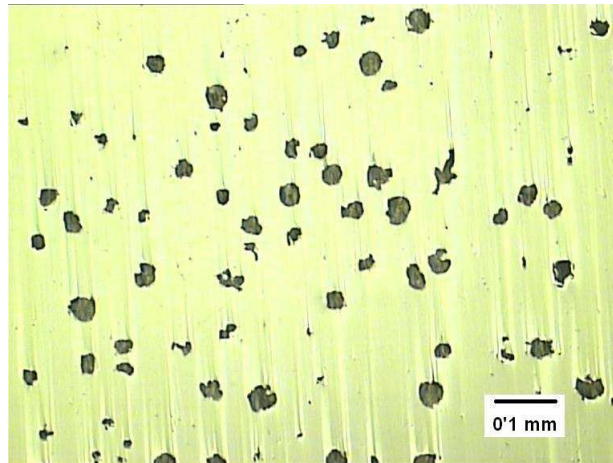


Figura 5-40: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (temple), sin ataque y a 100 aumentos.

En la figura 41 se puede observar una grieta que se produjo debido al enfriamiento en agua, debido a las tensiones creadas en la muestra por un enfriamiento rápido.

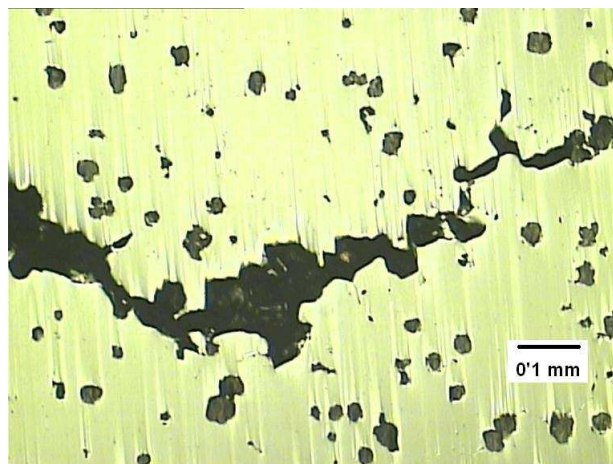


Figura 5-41: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (temple), sin ataque y a 100 aumentos.

Una vez atacada con nital, figura 42, se rebela la matriz martensítica.



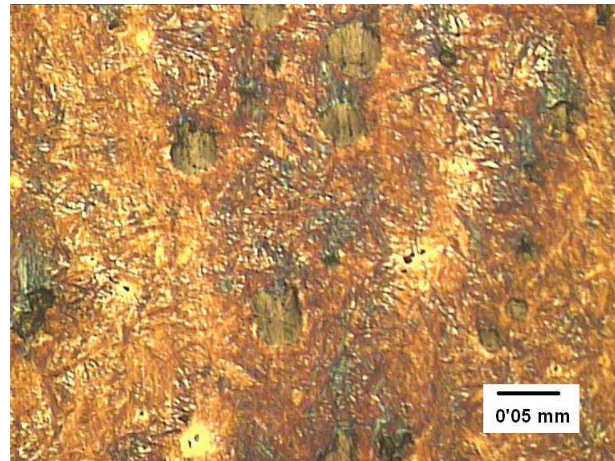


Figura 5-42: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (temple), atacada con nital y a 200 aumentos.

En figura 43 se observan con gran nitidez las agujas de martensita y como se entrecruzan, también el numero de agujas ha aumentado asi como su longitud. Las regiones blancas que se observan entre las agujas de martensita es austenita retenida.

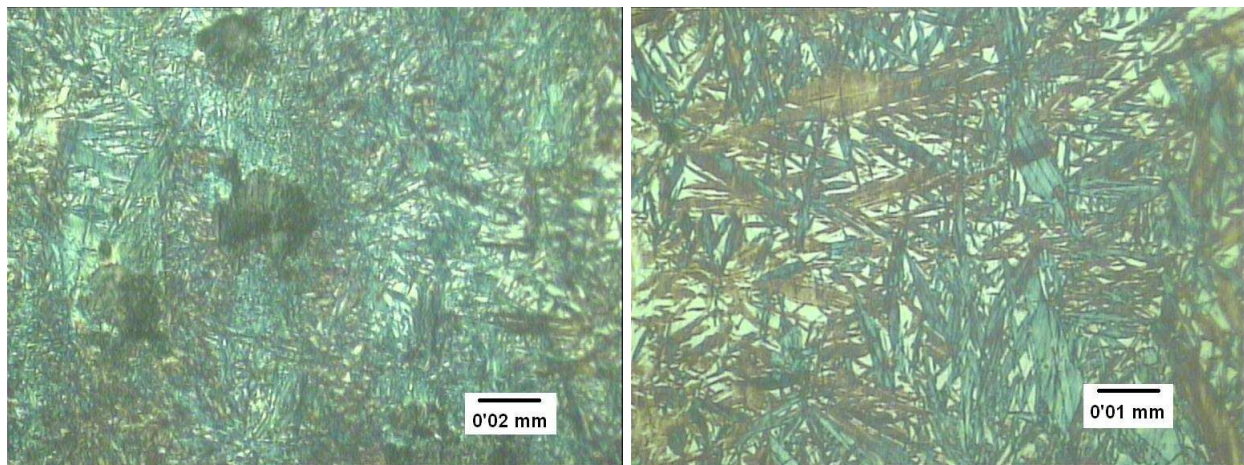


Figura 5-43: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (temple), atacada con nital y con optica Normanski. Izquierda 500 aumentos y derecha 1000 aumentos.

La dureza Rockwell C obtenida en este temple es la mayor junto con temple de 850°C -1hora, HRC=51. Como se dijo anteriormente la diferencia de dureza entre los temples se despreciara.



Enfriamiento en aire (normalizado).

Una muestra una vez terminado el tiempo de solubilización de 4 horas a 1000°C es enfriada en aire, las imágenes tomadas son las que se muestran a continuación.

En la figura 44 se observa una micrografía, aunque un poco difusa, con una distribución de nodulos no homogénea, diferentes tamaño de nódulo de grafito y con nodulos degenerados.

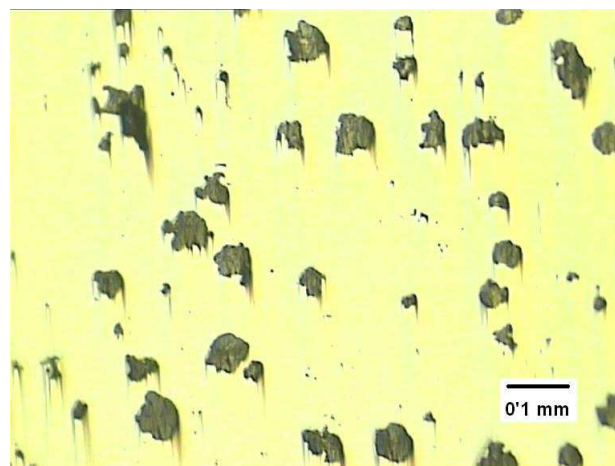


Figura 5-44: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (normalizado), sin ataque y a 100 aumentos.

En la micrografía 45 se observa, una vez atacada con nital, como la matriz es ferrítica-perlítica y la ferrita se encuentra alrededor de los nodulos de grafito. En los normalizados a 850°C la ferrita se encuentra distribuida en la matriz, pero a continuación se observa como a 1000°C la poca ferrita que hay esta alrededor de los nodulos de grafito.





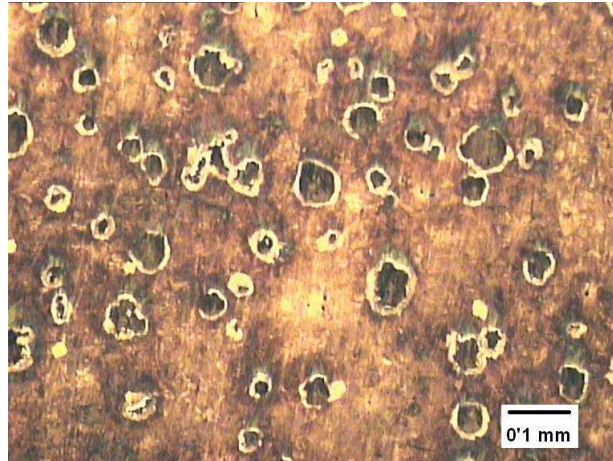


Figura 5-45: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (normalizado), atacada con nital y a 100 aumentos.

En figura 5-46 se puede observar como la poca ferrita que queda esta alrededor del nodule de grafico, a lo que se conoce como “ojo de buey”.

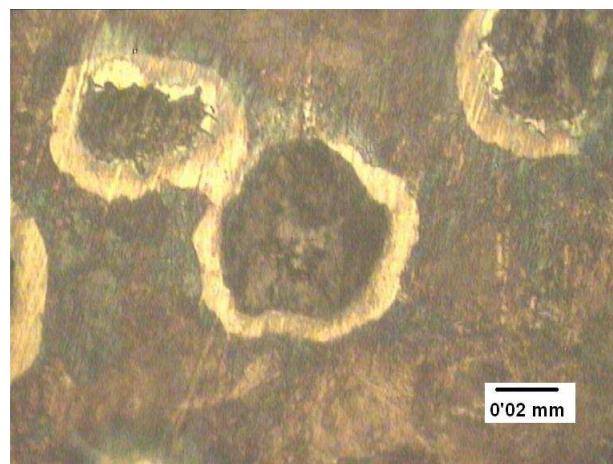


Figura 5-46: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (normalizado), atacada con nital y a 500 aumentos.

La dureza obtenida en este tratamiento térmico, HRB=95, es más elevado que en normalizado 850°C-1hora y prácticamente igual que en el normalizado 1000°C-1hora dado que la diferencia es prácticamente despreciable, la dureza es menor que en normalizado 850°C-4horas, esta diferencia de dureza debe ser por una distribución y tamaño de los nódulos de grafito menos homogénea.



Su elevada dureza se debe a que la cantidad de perlita formada es elevada, si se comparan las micrografías entre esta muestra y la muestra 850°C-1hora se observa como la cantidad de perlita formada es mayor en este normalizado y como la poca ferrita que hay esta alrededor de los nódulos.

#### Enfriamiento en horno (recocido).

Una muestra una vez terminado el tiempo de solubilización de 4 horas a 1000°C es enfriada en horno, las imágenes tomadas son las que se muestran a continuación.

En la figura 47 se observa una micrografía con una distribución de nodulos no homogénea, diferentes tamaño de nódulo de grafito y con nodulos degenerados, el tamaño de los nodulos son de menor tamaño que en normalizado anterior.

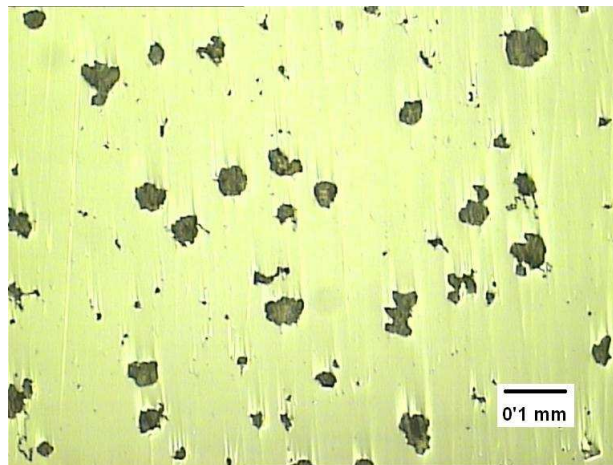


Figura 5-47: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (recocido), sin ataque y a 100 aumentos.

Una vez atacada la muestra con nital, figura 48 y 49, se observa como queda una matriz ferrítico-perlítica con gran cantidad de ferrita.





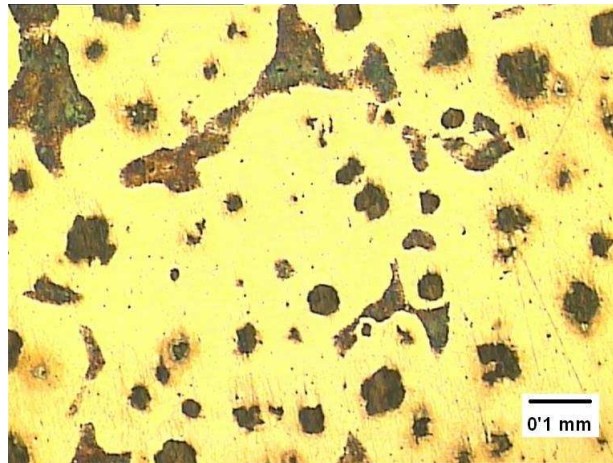


Figura 5-48: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (recocido), atacada con nital y a 100 aumentos.

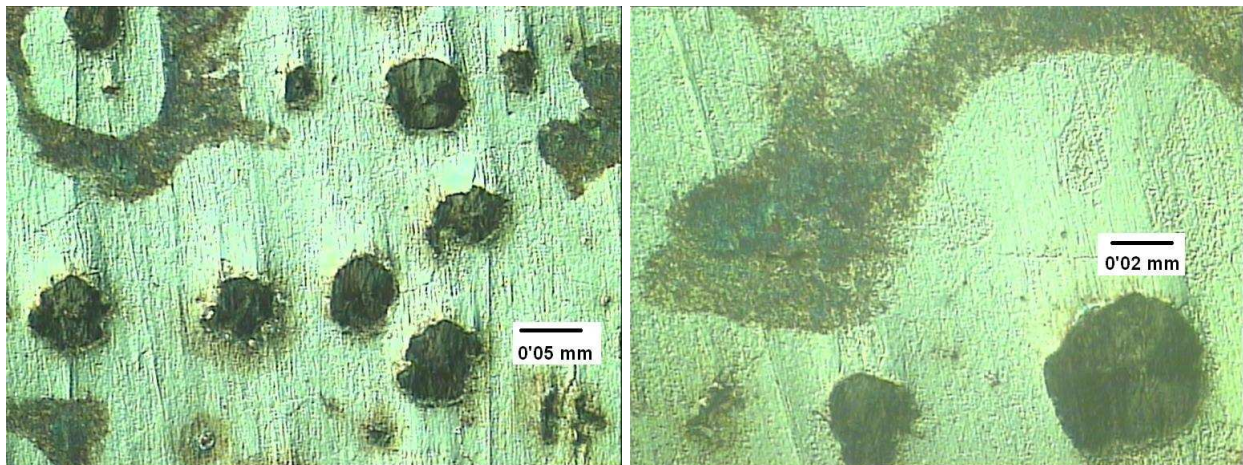


Figura 5-49: Micrografía de la muestra tratada térmicamente (recocido), atacada con nital y con optica de Normanski. Izquierda 200 aumentos y derecha 500 aumentos.

La dureza obtenida en este tratamiento térmico, HRB=70, es menor que la de los tratamientos térmicos de temple y normalizado y también menor que en la muestra suministro. Dentro de las muestras recocidas es la más baja, es menor que las muestras recocidas con tiempo de solubilización 1 hora aunque la cantidad de perlita sea mayor, esto es debido a una distribución y tamaño de los nódulos de grafito menos homogéneo.



### 5.3 RESUMEN DATOS E IMÁGENES OBTENIDAS

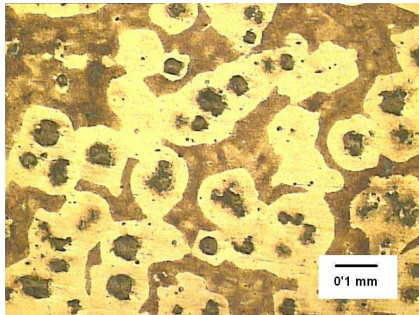
Una vez analizados los resultados a continuación se muestra un pequeño resumen de los datos e imágenes obtenidos donde se podrá observar las diferencias entre las muestras que se describieron anteriormente.

MUESTRA	TRATAMIENTO TERMICO	MICROESTRUCTURA MATRIZ	DUREZA	
			HRB	HRC
850C-1hora	Normalizado	Perlita (90% aprox) - ferrita (10% aprox)	90	51
	Recocido	Ferrita (90% aprox) - Perlita (10% aprox)	78	
	Temple	Martensita		
850C-4horas	Normalizado	Perlita (90% aprox) - ferrita (10% aprox)	99	49
	Recocido	Ferrita (90% aprox) - Perlita (10% aprox)	72	
	Temple	Martensita		
1000C-1hora	Normalizado	Perlita (90% aprox) - ferrita (10% aprox)	97	48
	Recocido	Ferrita (90% aprox) - Perlita (10% aprox)	78	
	Temple	Martensita		
1000C-4horas	Normalizado	Perlita (90% aprox) - ferrita (10% aprox)	95	51
	Recocido	Ferrita (90% aprox) - Perlita (10% aprox)	70	
	Temple	Martensita		
Suministro	Ninguno	Ferrita (50% aprox) - Perlita (50% aprox)	87	



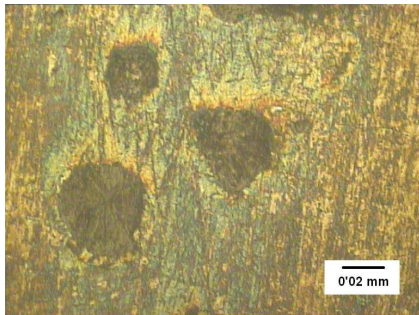
### Muestra suministro

Imágenes de las muestras atacadas con nital y a 500 aumentos.

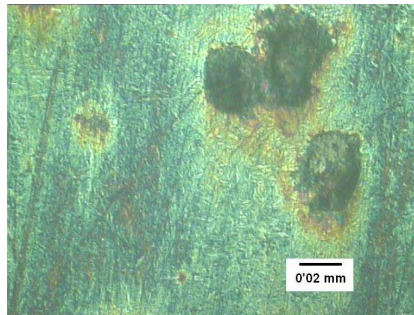


### Muestras templadas

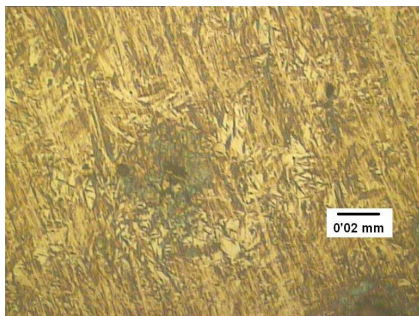
Imágenes de las muestras atacadas con nital y a 500 aumentos.



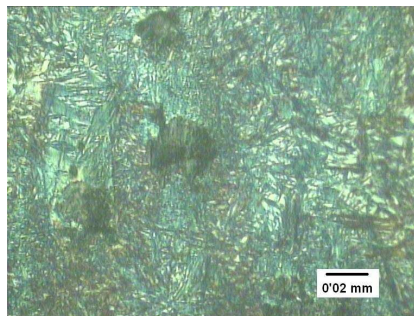
$T^a=850\text{ }^{\circ}\text{C} - t=1\text{ hora}$



$T^a=850\text{ }^{\circ}\text{C} - t=4\text{ horas}$



$T^a=1000\text{ }^{\circ}\text{C} - t=1\text{ hora}$



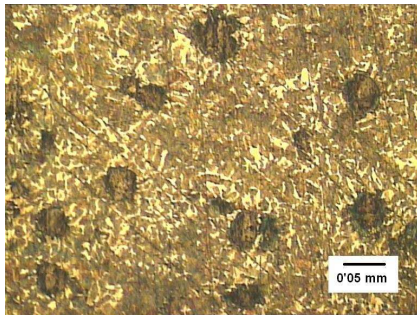
$T^a=1000\text{ }^{\circ}\text{C} - t=4\text{ horas}$



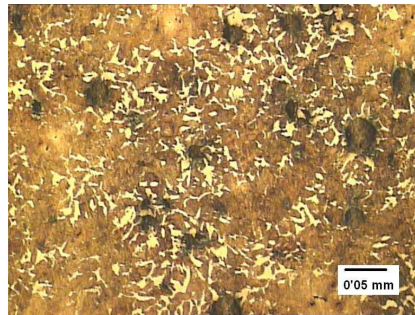


### Muestras normalizadas

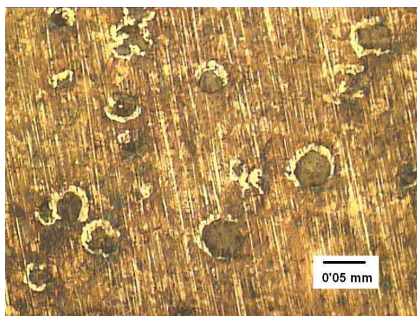
Imágenes de las muestras atacadas con nital y a 200 aumentos.



$T^a=850\text{ }^{\circ}\text{C} - t=1\text{ hora}$



$T^a=850\text{ }^{\circ}\text{C} - t=4\text{ horas}$



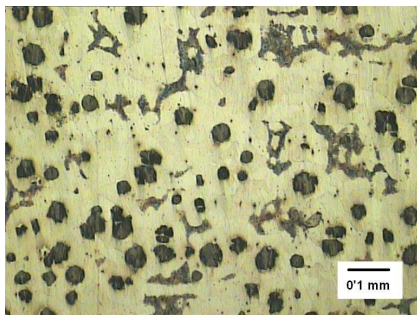
$T^a=1000\text{ }^{\circ}\text{C} - t=1\text{ hora}$



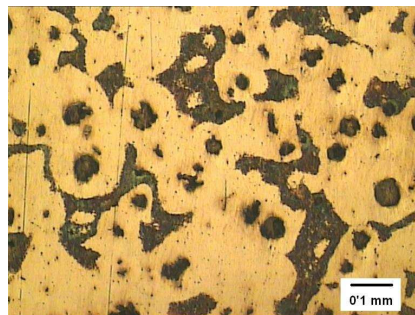
$T^a=1000\text{ }^{\circ}\text{C} - t=4\text{ horas}$

### Muestras recocidas

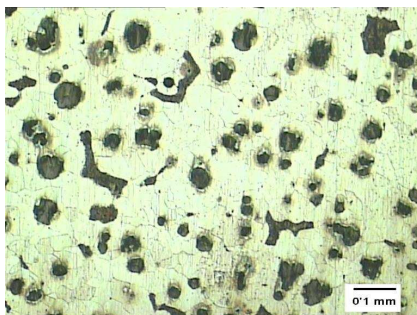
Imágenes de las muestras atacadas con nital y a 100 aumentos.



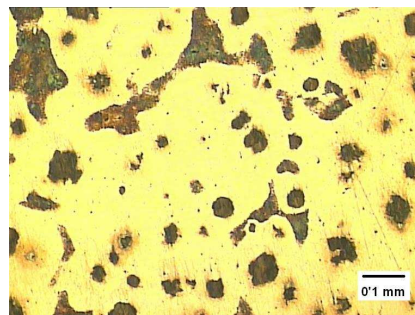
$T^a=850\text{ }^{\circ}\text{C} - t=1\text{ hora}$



$T^a=850\text{ }^{\circ}\text{C} - t=4\text{ horas}$



$T^a=1000\text{ }^{\circ}\text{C} - t=1\text{ hora}$



$T^a=1000\text{ }^{\circ}\text{C} - t=4\text{ horas}$



## **6. CONCLUSIÓN**

Este proyecto permitió aplicar los conocimientos adquiridos sobre materiales utilizados en la ingeniería, más concretamente fundición de grafito esferoidal o dúctil, así como procesos de tratamientos térmicos y metalografía. Se puede concluir que fue una experiencia enriquecedora con la que se comprobó la teoría en la práctica.

Se realizaron tratamientos térmicos de temple, recocido y normalizado a muestras que fueron cortadas de un cilindro de fundición de grafito esferoidal en bruto de colada. Una muestra fue guardada como muestra suministrada por el proveedor. Se realizaron análisis metalográficos y ensayos de dureza a dichas muestras, un total de 13 muestras. Se encontró que los tratamientos térmicos afectan en gran medida a la dureza y que se producen grandes cambios en la microestructura de la fundición de grafito esferoidal o dúctil.

Durante el análisis de los datos e imágenes obtenidas al realizar el tratamiento térmico de las muestras se obtuvo las conclusiones siguientes:

- En rasgos generales se puede observar como en el tratamiento térmico de **temple** cambia la microestructura de una matriz ferrítico-perlítica a una matriz martensítica y que el valor obtenido el ensayo de dureza muestra como la dureza aumento en gran medida, respecto de la muestra tomada del suministro. También se puede observar como la dureza obtenida mediante este tratamiento térmico era mucho mayor que la del resto de los tratamientos térmicos realizados. En las muestras sometidas a dicho tratamiento térmico se observó como la dureza de cada una de las cuatro muestras no varía en gran medida, por consiguiente se puede decir que la temperatura y tiempo de solubilización empleados en este proyecto no tienen gran influencia en la dureza de las muestras de fundición nodular tratadas térmicamente con templado. Respecto a la microestructura se observa como el tiempo de solubilización influye en la formación de las agujas de martensita, al aumentar el tiempo de solubilización las agujas de martensita se ven con



mayor nitidez y se puede observar como hay mayor número de agujas, más finas y de mayor longitud.

- En el tratamiento térmico de **normalizado** se observa como la cantidad de perlita aumenta en gran medida en la matriz ferrítico-perlítica y como la dureza aumento respecto a muestra suministro debido a la reducción de la ferrita en la matriz. En las muestras sometidas a este tratamiento térmico se observo como respecto a la dureza los resultados los resultados obtenidos no muestran un patrón, por consiguiente se puede decir que el tiempo de solubilización y la temperatura no afecta directamente a la dureza de las muestras de fundición nodular sometidas ha dicho tratamiento térmico. Respecto a la microestructura de estas muestras se puede observar como el aumento de temperatura favorece la formación de la perlita y también que la temperatura afecta a la distribución de la ferrita en la matriz, formando ojos de buey o distribuida en la matriz. El cambio de tiempo de solubilización no afecta en gran medida a la formación de la perlita y distribución de la ferrita pero si afecta a la homogeneidad de la distribución, forma y tamaño de los nódulos de grafito en la matriz.
- En el tratamiento térmico de **recocido** se observa como disminuye la cantidad de perlita en la matriz ferrítico-perlítica inicial y que el ensayo de dureza muestra como la dureza disminuye, respecto a la muestra suministro. Se observo como la dureza de las cuatro muestras no varia en función de la temperatura por lo que se llega a la conclusión de que para el recocido la variación de la temperatura utilizada en este proyecto no hace variar el valor de la dureza que se obtiene. Sin embargo, si que se observo como el valor de la dureza si que varia cuando se modifica el tiempo de solubilización, al aumentar el tiempo de solubilización disminuye el valor de la dureza obtenido en las muestras, por consiguiente se puede decir que el tiempo de solubilizacion si que influye directamente en el valor de la dureza de las muestras sometidas al tratamiento térmico



de recocido. Respecto a la microestructura de estas muestras se puede observar como el aumento de temperatura no influye en la matriz dado que no se encuentran diferencias. El cambio de tiempo de solubilización afecta a la homogeneidad de la distribución y tamaño del grafito en la matriz, a mayor tiempo de solubilización menor homogeneidad del grafito en la matriz. También afecta al tamaño y cantidad que presenta el grafito en la matriz, a mayor tiempo de solubilización menor cantidad de nódulos de grafito y mayor tamaño. Respecto a la cantidad de perlita que hay en la matriz se puede decir que a mayor tiempo de solubilización mayor cantidad de perlita presente en la matriz aunque no en gran medida.

## **7. BIBLIOGRAFÍA**

- [1] UNE-EN\_1560=1997\_Sistema de designación para Fundiciones de hierro.
- [2] UNE-EN\_1563=1998\_Fundición de grafito esferoidal.
- [3] UNE-EN\_ISO\_945=1996\_Designación de la microestructura del grafito.
- [4] -UNE-EN\_ISO\_6508-1=2007\_Ensayo de dureza Rockwell.  
-UNE-EN\_ISO\_6508-2=2007\_Ensayo de dureza Rockwell.  
-UNE-EN\_ISO\_6508-3=2007\_Ensayo de dureza Rockwell.
- [5] <http://www.ductile.org/didata/Section4/4intro.htm>
- [6] <http://www.arqhys.com/contenidos/hierro-tratamiento.html>





